Aus der Abteilung für klinische Prothetik
(Leiter: Professor Dr. med. dent. Karl Eichner)
der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
des Fachbereiches Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Freien Universität Berlin

MECHANISCHE UND MIKROMORPHOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN VON LÖTVERBINDUNGEN DER NICHTEDELMETALLEGIERUNG WIRON 88

Dissertation
zur
Erlangung der zahnmedizinischen Doktorwürde
am Fachbereich Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Freien Universität Berlin

vorgelegt von
Zahnärztin Celina Schätze
aus Berlin

1995

Aus der Abteilung für klinische Prothetik
(Leiter: Professor Dr. med. dent. Karl Eichner)
der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
des Fachbereiches Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Freien Universität Berlin

MECHANISCHE UND MIKROMORPHOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN VON LÖTVERBINDUNGEN DER NICHTEDELMETALLEGIERUNG WIRON 88

Dissertation
zur
Erlangung der zahnmedizinischen Doktorwürde
am Fachbereich Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Freien Universität Berlin

vorgelegt von
Zahnärztin Celina Schätze
aus Berlin

Referent: Professor Dr. Karl Eichner
Korreferent: Professor Dr. Eveline Meyer

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereiches Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Freien Universität Berlin

Promoviert am: 07.06.1985

INHALTSVERZEICHNIS

		Seite
1	EINLEITUNG	6
2	ALLGEMEINER TEIL	7
2.1	Das Löten	7
2.2	Das Löten von NEM-Aufbrennlegierungen	10
3	SPEZIELLER TEIL	13
3.1	Die Legierungen - Grundwerkstoff und Lote	13
3.1.1	Wiron 88	13
3.1.2	Lote	14
3.2	Eigene Untersuchungen	16
3.2.1	Versuchsplanung, Vorversuche	16
3.2.2	Herstellung der Prüfkörper	17
3.2.2.1	Herstellung der Gußkörper	17
3.2.2.2	Herstellung der gelöteten Prüfkörper	18
3.2.3	Versuchsdurchführung	20
3.2.3.1	Zugversuche	20
3.2.3.2	Versuchsergebnisse	22
3.3	Metallographische Untersuchungen	25
3.3.1	Herstellung der Proben	25
3.3.2	Betrachtung mit dem Auflichtmikroskop	28
3.3.3	Betrachtung mit dem Rasterelektronenmikroskop und Vergleich mit Mikrosondenuntersuchungen	29
4	DISKUSSION	40
5	ZUSAMMENFASSUNG	43
6	SCHRIFTTUM	44
7	ANHANG	50
8	LEBENSLAUF	72

1 EINLEITUNG

Nichtedelmetall-Legierungen (NEM) für die Zahnersatzherstellung sind auf Grund der zunehmend geringeren Verfügbarkeit von Edelmetall, der schnellen Erhöhung des Goldpreises und im Zusammenhang mit dem Wunsch nach Kostendämpfung im Gesundheitswesen von zunehmender Bedeutung, auch in der Metallkeramik.

Neben dem geringeren Preis haben Nichtedelmetall-Legierungen noch weitere Vorteile gegenüber den Legierungen aus Edelmetallen: geringere Wärmeleitfähigkeit, geringere Dichte und höhere Festigkeit, die grazilere Ausführungen von Zahnersatz erlaubt.

Vorzugsweise werden heute auch mehrgliedrige zahnärztliche Brücken im Einstückgußverfahren hergestellt. Für umfangreichen oder kombiniert festsitzend-abnehmbaren Zahnersatz und für notwendige Korrekturen ursprünglich in einem Stück gegossener Werkstücke ist das Löten jedoch ein wichtiger und häufig unvermeidlicher Arbeitsgang während der Herstellung.

Anlaß zu diesen Untersuchungen waren Überlegungen, die die Oxidationsbereitschaft von NEM-Legierungen als Hindernis für eine einwandfreie Lötung erscheinen lassen. Hinzu kamen persönliche Mitteilungen verschiedener Dentallaboratorien über Schwierigkeiten im Zusammenhang mit dem Löten von NEM-Legierungen. In den vorgelegten Untersuchungen werden die drei vom Hersteller der verwendeten Legierung (Wiron 88 der Fa. Bego) empfohlenen Verfahren miteinander verglichen. Dieser Werkstoff gehört zur jüngsten Generation der Ni-Cr-Legierungen.

Festigkeitsuntersuchungen der Lötverbindungen erfolgen durch Zugversuche. Außerdem wird die Mikromorphologie von Lötstellen, d.h. der Grenzbereiche von Lötgut und Lot mit Hilfe von Lichtmikroskop, Rasterelektronenmikroskop und Mikrosonde dargestellt. Aus der Mikromorphologie können einige Schlüsse auf Art und Umfang der während des Lötvorganges ablaufenden Diffusionsprozesse gezogen werden.

2 ALLGEMEINER TEIL

2.1 Das Löten

Das Löten ist ein sehr altes Verfahren, das schon im vierten vorchristlichen Jahrhundert bei den Sumerern bekannt war (18).

Traditionell verstand man unter Löten das Verbinden oder Ergänzen metallischer Werkstücke mit Hilfe eines geschmolzenen Zusatzmetalls, dessen Schmelztemperatur unterhalb der der Grundwerkstoffe liegt (18).

Neuerdings wurde der Begriff etwas weiter gefaßt (DIN 8505): "Das Löten ist ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen und Beschichten von Werkstoffen, wobei eine flüssige Phase durch Schmelzen eines Lotes (Schmelzlöten) oder durch Diffusion an den Grenzflächen (Diffusionslöten) entsteht. Die Solidustemperatur der Grundwerkstoffe wird nicht erreicht." Hier wird allgemein von Werkstoffen gesprochen, nicht nur von Metallen.

Die Verbindung zwischen Lot und Lötgut beruht auf interatomarer Adhäsion und auf Platzwechselvorgängen zwischen den Gitterstrukturen an den Grenzflächen der beiden Materialien (25), (37).

Je nach der Liquidustemperatur der verwendeten Lote unterscheidet man Weichlöten (Liquidustemperatur unter 450 °C) und Hartlöten (Liquidustemperatur über 450 °C).
Weichgelötet wird meist mit Blei-Zinn-Loten, die ein heterogenes Erstarrungsgefüge aufweisen. Diese Verbindungen haben eine geringe Festigkeit und sind nicht korrosionsstabil (18), (19), (35).
Höhere Festigkeiten lassen sich durch das Hartlöten erzielen. Das Korrosionsverhalten hierbei hängt von den jeweils verwendeten Loten ab. In diesem Zusammenhang ist ein homogen-feinkörniges Erstarrungsgefüge erwünscht, das auch die mechanischen Eigenschaften des Materials positiv beeinflußt (19).

Die Lote sollen dem Grundwerkstoff möglichst ähnlich sein. Eine stoffliche Verwandtschaft fördert die Benetzbarkeit der zu verlötenden Oberflächen durch das Lot, für die die Legierbarkeit der Bestandteile von Lot und Lötgut untereinander Voraussetzung ist (25), (38).
Ähnliches gilt für die in den Grenzbereichen ablaufenden Diffusionsvorgänge (18). Bei sehr großer Ähnlichkeit zwischen Lot und Grundwerkstoff kommt es zu einer Ausbildung gemeinsamer Korngrenzen im Kontaktbereich (5), (39).

Eine möglichst weitgehende Übereinstimmung in den physikalischen Eigenschaften zwischen Lot und Lötgut ist notwendig, damit Lötungen durchgeführt werden können, ohne die gewünschten Eigenschaften des Grundwerkstoffes stark zu beeinträchtigen.
Dicht beieinander liegende Normalpotentiale vermeiden das Auftreten von Lokalelementen.

Liegt die Arbeitstemperatur des Lotes dicht (30 bis 50°C) unter der Solidustemperatur des Lötgutes, so kann auf Grund der größeren kinetischen Energie der Gitterbausteine des Grundwerkstoffes mit umfangreicheren Diffusionsprozessen gerechnet werden als bei einem großen Temperaturabstand (14).
Im Widerspruch zu diesen Angaben steht die Feststellung, daß Lötungen mit stofflich nicht verwandten Loten mit brauchbarem Erfolg durchgeführt werden. Die Arbeitstemperaturen liegen weit unter der Solidustemperatur des Lötgutes. MARXKORS (19) meint, daß für die Verbindung die Adhäsion ausreichend und eine Legierungsbildung nicht unbedingt erforderlich seien.

Um einen innigen Kontakt zwischen Lot und Lötgut zu ermöglichen, muß die Lötstelle sauber, metallisch blank und oxidfrei sein.
Diese Oxidfreiheit wird durch sogenannte Flußmittel erreicht, mit denen die Lötstelle sowie das Lot beschickt werden. Flußmittel sind im allgemeinen Borverbindungen mit Zusätzen von Chloriden, Fluoriden, Phosphaten, Silikaten u.ä. (DIN 8511). Sie sollen bereits vorhandene Oxide reduzieren, als Oxidationshemmer wirken und durch die Bildung

einer zähflüssigen Schmelze über allen beteiligten Oberflächen den Zutritt von Luftsauerstoff zur Lötstelle verhindern (19), (37). Die Affinität des Flußmittels zu den zu verlötenden Oberflächen muß geringer sein als die des Lotes, damit es beim Verschießen des Lotes verdrängt werden kann (27).
Weitere Möglichkeiten, der Oxidation zu begegnen, sind das Löten im Vakuum oder unter einem Schutzgas, das reduzierend oder inert sein kann.

Wesentlich für den Erfolg der Lötung ist die Geometrie der Verbindungsstelle. Bei mehr als 0,5 mm Abstand der zu verbindenden Teile voneinander spricht man von einer Lötfuge, bei einem geringeren Abstand von einem Lötspalt. Vorteilhaft ist ein Lötspalt: Das Verschießen des Lotes wird durch die zwischen den Spaltwänden und der Schmelze auftretenden Kapillarkräfte unterstützt, und die Lotmenge wird möglichst gering gehalten, was eine schnelle, feinkörnige Erstarrung ermöglicht und die Folgen der immer auftretenden Erstarrungsschrumpfung (Hohlräume, Dehiszenzen) verringert (18), (25), (38). Ein parallelwandiger Spalt von 0,05-0,3 mm Breite gilt als ideal (18), (19), (35).
Als minimale Spaltbreite wird 0,02 mm angegeben (25), (38). Dies hängt wahrscheinlich mit der Viskosität der Flußmittelschmelze und der der Lotschmelze zusammen. Auch die Flußmittelmenge, die im Spalt Platz hat, und deren Reduktionsvermögen könnten eine Rolle spielen (38).

Von Einfluß auf die Qualität der Verbindung ist auch die Lötzeit. Einerseits werden durch langes Erhitzen umfangreichere Diffusionsprozesse ermöglicht und somit eine innigere Verbindung zwischen Lot und Lötgut hergestellt, andererseits werden Veränderungen im Gefüge des Grundwerkstoffes hervorgerufen, die seine Materialeigenschaften in unerwünschter Weise beeinträchtigen können (18), (22), (25). Nach SCHATZ (25) sind die in den Sekundenbruchteilen während des Verschießens des Lotes ablaufenden Diffusionsvorgänge für eine Verbindung ausreichend.

Zum Ausgleich während der Lötung entstandener innerer Spannungen kann es sinnvoll sein, das Werkstück anschließend einer Wärmebehandlung bei

niedrigeren Temperaturen zu unterziehen (35). Bei vielen modernen Legierungen laufen diese nachträglich zu induzierenden Prozesse bereits beim langsamen Abkühlen nach dem Löten ab.

Die Erhitzung für den Lötvorgang geschieht entweder in einem Ofen oder mittels eines Brenngas-Sauerstoff- bzw. eines Brenngas-Luft-Brenners mit offener Flamme. Bei der Ofenlötung ist eine genau programmierte Temperaturführung möglich. Es kann unter Schutzgas oder im Vakuum gearbeitet werden. Die Flammlötung ist nicht so gut steuerbar und hängt im Erfolg stark von der Erfahrung und dem Geschick der die Lötung durchführenden Person ab. Vorteil dieser Methode ist jedoch der geringere Aufwand an Zeit und Apparaten.

2.2 Das Löten von NEM-Aufbrennlegierungen

Im Umgang mit Legierungen zum Aufbrennen keramischer Massen muß auf die empfindliche Abstimmung zwischen Gerüstwerkstoff und Aufbrennkeramik Rücksicht genommen werden. Diese kann durch jede Veränderung in den physikalischen Eigenschaften des Gerüstmaterials und durch jede chemische Oberflächen-Veränderung der zu verblendenden Bereiche gestört werden. Erhitzungsvorgänge im Rahmen von Lötungen können solche Veränderungen hervorrufen.

Wie bei allen Aufbrennlegierungen werden auch bei NEM-Legierungen Verfahren zum Löten vor und nach dem Brand empfohlen. Die Lötung vor dem Brand wird wegen der hierfür notwendigen hohen Temperaturen und wegen der einfacheren Handhabbarkeit als Flammlötung unter Verwendung von besonders hitzestabilen Flußmitteln und Einbettmassen durchgeführt. Für das Löten nach dem Brand ist zum Schutz der Keramik vor thermischen Spannungen die exakte Temperaturführung in einem Brennofen erforderlich.

Im Mittelpunkt aller Oberlegungen zum Löten von NEM-Legierungen steht die große Oxidationsbereitschaft dieser Legierungen. Wie bereits oben

erwähnt, sind oxidfreie Oberflachen Voraussetzung jeder Lötung. Diese Oxidfreiheit ist hier schwerer zu erreichen als bei Legierungen mit einer geringeren Oxidationsbereitschaft.

Es werden aggressive Flußmittel benötigt, die die oberflächliche Gefügestruktur des Werkstoffes beeinträchtigen können (1) und dadurch möglicherweise die keramische Bindung stören. Beim Löten nach dem Brand kann bei Kontakt der Keramik mit dem Flußmittel die Glasur beschädigt werden (12).
Das Löten unter Schutzgas erfordert einen großen apparativen Aufwand, der in zahntechnischen Laboratorien unerwünscht ist.

Das Löten nach dem Brand muß bei Temperaturen unterhalb der Keramikbrenntemperatur erfolgen. Hierfür werden Edelmetallote mit einer entsprechenden Arbeitstemperatur verwendet. Diese sind in ihrer Zusammensetzung dem Grundwerkstoff wenig verwandt. Daraus können Schwierigkeiten hinsichtlich der Benetzung des Grundwerkstoffes sowie der Diffusion der Legierungsbestandteile ineinander entstehen. Weiterhin muß mit der Bildung von Lokalelementen gerechnet werden.
Schwierigkeiten bezüglich der Grenzflächenaktivität ergeben sich auch aus dem großen Abstand zwischen Solidustemperatur des Lötgutes und Arbeitstemperatur des Lotes. Zur "Überbrückung" dieser Temperaturdifferenz werden die Lötspaltwände mit einem hochschmelzenden Weißgoldlot durch Flammlötung überzogen (10), (21). Diesen Vorgang bezeichnet man als Vorschwemmen. Die Weißgoldschichten werden dann im Ofen mit Goldlot verbunden.
Die Nachteile dieses Verfahrens sind neben dem erforderlichen Arbeitsaufwand die Einführung einer dritten Legierung in das Werkstück und der zusätzliche Erhitzungsvorgang.

Neben diesem Verfahren besteht die Möglichkeit einer direkten Ofenlötung ohne Vorschwemmen mit Hilfe eines niedrigschmelzenden Weißgoldlotes. Über die physikalisch-chemischen Abläufe während dieses Verbindungsvorganges herrscht Unklarheit, aber die erzielten Ergebnisse scheinen akzeptabel zu sein (10), (23), (33).

Die Summe der dargestellten Schwierigkeiten veranlaßt einige Autoren, die Lötbarkeit von NEM-Legierungen anzuzweifeln (9), (32), (33). Viele andere Autoren bezeichnen das Löten von NEM-Legierungen zumindest als "grundsätzlich problematisch" (16b), (30), (31), (36). Dies wird durch persönliche Erfahrungen in der Zusammenarbeit mit Dentallaboratorien bestätigt.

Unter den meisten Autoren herrscht Einigkeit darüber, daß das Löten im Ofen nach dem Brand zu besseren Ergebnissen führt. Diese Lötungen werden als homogener im Gefüge beschrieben. Sie enthalten weniger Porositäten und Oxidbildungen (16b), (28), (29), (30). LANGENBACH (17) kam allerdings zu dem Ergebnis, daß unabhängig von diesen metallographischen Erkenntnissen die Biegefestigkeit von Flammlötungen vor dem Brand größer ist.

Für eine richtige Gewichtung der Aussagen muß gesagt werden, daß die Streuung der Ergebnisse bei allen Lötungen, auch wenn sie lege artis durchgeführt wurden, relativ groß ist (4). Auch bei Edelmetallen-Legierungen ist die Lötstelle bzw. das Lot die Schwachstelle des Werkstükkes. Risse treten bevorzugt innerhalb der Lotschicht auf (13), (35). LANGENBACH (17) gibt für seine an Wiron 77 durchgeführten Lötungen einen Biegefestigkeitsverlust gegenüber dem ungelöteten Material von 45 bis 50 % an.

3 SPEZIELLER TEIL

3.1 Die Legierungen - Grundwerkstoff und Lote

3.1.1 Wiron 88

Es handelt sich um einen Gerüstwerkstoff für die Aufbrennkeramik aus der Gruppe der Nickel-Chrom-Legierungen (Fa. Bego, Bremen). Dieses Material ist eines der letzten Ergebnisse einer seit den sechziger Jahren laufenden Entwicklung ähnlicher Legierungen.

Es gibt z.Z. noch wenige Untersuchungen über Wiron 88. Die Vorläuferlegierung Wiron 77 ist hingegen vielfach untersucht worden (10), (11), (33), (34),. Im Zusammenhang mit dem Wiron 88 wird von GUNDLACH (10) und in den BEGO-Veröffentlichungen (2) nur auf die Untersuchungen des Wiron 77 verwiesen und die diesem gegenüber verringerte Härte und gesteigerte Bruchdehnung hervorgehoben. Die einer besseren Verarbeitbarkeit dienenden Veränderungen sollen ohne eine Festigkeitsminderung erreicht worden sein.

Die Hauptbestandteile der Legierung sind Nickel (Ni), Chrom (Cr) und Molybdän (Mo). Diese bestimmen das für die metallkeramische Verarbeitung bedeutsame Ausdehnungsverhalten. Chrom und Molybdan machen das Material durch Passivierung korrosionsfest. In kleinen Mengen werden andere Elemente hinzulegiert, um bestimmte Eigenschaften zu erreichen. Niob (Nb), Zer (Ce), Titan (Ti) und Aluminium (Al) dienen als Oxidationshemmer, um eine separierende Oxidschicht durch Chrom und Nickel unter der Keramik zu vermeiden. Verarbeitungseigenschaften und Festigkeit werden durch Silizium (Si), Mangan (Mn), Kobalt (Co) und Molybdan (Mo) beeinflußt (20).

Wiron 88 erstarrt in einem homogenen Mischkristallgefüge mit Ausscheidungen von intermetallischen Phasen sowohl im Korninneren als auch an den Grenzen (11).

Die BEGO-Werksangaben über die chemische Zusammensetzung und die physikalischen Eigenschaften des Wiron 88 sind in den Tabellen 1 und 2 zusammengefaßt.

Ni	Cr	Mo	Si, C, Nb, Ce, Ti, Al, V, B
70	20	6-8	Rest

Tab. 1: Chemische Zusammensetzung von Wiron 88 in Gew.-Prozent (BEGO-Werksangabe)

Schmelzintervall °C	Dehngrenze ($R_p0,2$) N/mm²	Vickers-Härte (HV 10)
1340-1280	360	205 nach Brand

Tab. 2: Mechanische und physikalische Eigenschaften von Wiron 88 (BEGO-Werksangabe)

3.1.2 Lote

Je nach dem gewählten Lötverfahren werden verschiedene Lote zur Verbindung von Wiron 88-Teilen empfohlen (2):

Wironlot wird bei der Lötung vor dem Brand verwendet. Es hat eine Arbeitstemperatur von 1165 °C, dicht am Soliduspunkt des Wiron 88. Die Zusammensetzung des Lotes ist gegenüber der des Wiron 88 zu Gunsten einer Schmelzpunkterniedrigung verändert (Tab. 3). Wironlot ist keramisch verblendbar.

Ni	Cr	Mo	Fe	Co	Si, B, C
73	16	3	1-2	3	Rest

Tab. 3: Chemische Zusammensetzung von Wironlot in Gew.-Prozent (BEGO-Werksangabe)

Ofenlötungen können auf verschiedene Weise und mit unterschiedlichen Loten durchgeführt werden.
Eine Möglichkeit ist es, auf die Stirnseiten der Verbindungsstelle vor dem Brand ein hochschmelzendes Weißgoldlot (1020 °C Arbeitstemperatur) mittels Flammlötung aufzuschwemmen und diese Weißgoldlotflächen nach dem Brand mit Goldlot-1 (Arbeitstemperatur 800 °C) im Ofen zu verbinden (Tab. 4 und 5). Sinn dieses Verfahrens ist es, den Abstand zwischen dem Soliduspunkt des Grundwerkstoffes und der Arbeitstemperatur des Goldlotes durch das Weißgoldlot zu "überbrücken".

Au	Pt	Ag	Cu	Zn	Sn	In
65	15	8,3	7,1	1,8	1,3	1,5

Tab. 4: Chemische Zusammensetzung von BEGO-Weißgoldlot-1 in Gew.-Prozent (BEGO-Werksangabe)

Au	Ag	Cu	Zn	Sn	In
72,7	9,3	12,4	3,1	2,4	0,1

Tab. 5: Chemische Zusammensetzung von BEGO-Goldlot-1 in Gew.-Prozent (BEGO-Werksangabe)

Mit WGL-Lot (Arbeitstemperatur 810 °C) besteht die Möglichkeit zu einer direkten Ofenlötung. Es handelt sich um ein niedrigschmelzendes Weißgoldlot mit einem Nickelzusatz (Tab. 6). Worauf die so hergestellten Verbindungen beruhen und ob es sich um echte Lötungen handelt bzw. welche Diffusionsprozesse sich bei der niedrigen Arbeitstemperatur an den Werkstückgrenzflächen abspielen, ist unklar. Die BEGO (2) nennt dieses Verfahren "Reparaturlöten" und GUNDLACH (10) wertet die erreichte Festigkeit als klinisch akzeptabel.

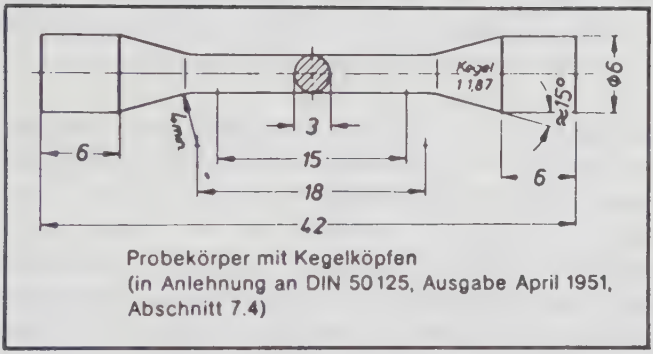
Au	Ag	Ni	Zn	Cu	In
65	12	6	14	2	1

Tab. 6: Chemische Zusammensetzung von WGL-Lot in Gew.-Prozent (BEGO-Werksangabe)

3.2 Eigene Untersuchungen

3.2.1 Versuchsplanung, Vorversuche

Die Versuchsplanung erfolgte in Anlehnung an bereits vorliegende Arbeiten mit ähnlicher Fragestellung (13), (16a), (39).
Die Form der Prüfkörper ist in DIN 13 906 festgelegt (Abb.1). Die "Hantelform" ist zweckmäßig für das Einspannen in die Instron-Universalprüfmaschine, die Normabmessungen dienen der Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.



Probekörper mit Kegelköpfen
(in Anlehnung an DIN 50125, Ausgabe April 1951, Abschnitt 7.4)

Abb. 1: Prüfkörper nach DIN 13 906

In den Vorversuchen entstand eine Serie von Fehlgüssen durch das Anbringen von zwei in die dicken Enden des Prüfkörpers mündenden Gußkanälen. In der Vereinigungszone der beiden Gußströme bildete sich eine große Zahl von Lunkern. Von der Norm abweichend wurden die endgültig verwendeten Prüfkörper an einem Ende mit einem axialen Gußstift und an dem gegenüberliegenden mit einem Luftabzugskanal versehen.

3.2.2 .Herstellung der Prüfkörper

3.2.2.1 Herstellung der Gußkörper

Ausgegangen wurde von Prüfkörperschablonen in einem ausbrennbaren Kunststoff (Fa. Heraeus), die in der oben beschriebenen Weise mit Gußstiften und Luftabzugskanälen aus Wachs versehen wurden.

Nach Entspannung der Wachs- bzw. Kunststoffoberfläche mit Aurofilm (Fa. Bego) erfolgte die indirekte Vakuumeinbettung mit Begoral (Fa. Bego), einer phosphatgebundenen, hochtemperaturstabilen Einbettmasse, die in ihrem Expansionsverhalten auf Wiron abgestimmt ist.

Nach dem Abbinden (ca. 30 min.) wurden Wachs und Kunststoff ausgeschmolzen (30 min. 250 °C, dann 45 min. 450 °C). Anschließend wurde für 45 min. bei 950 °C vorgewärmt.

Das Schmelzen und Vergießen des Metalls erfolgte in einer Hochfrequenz-Induktionsgußmaschine, Modell Fornax. Hierfür sind Keramiktiegel erforderlich, da eine Kohlenstoffaufnahme der Legierung bei Verwendung von Graphittiegeln zur Versprödung führt (10).
Der Firmenempfehlung entsprechend kam nur unvergossenes Metall zur Anwendung.

Nach dem Guß wurden die Objekte langsam auf Zimmertemperatur abgekühlt, dann ausgebettet und in Aurocid (Fa. Bego) abgesäuert. Zum Abschluß wurden die Prüfkörper von den Gußkanälen getrennt und mit Korund abgestrahlt (Abb. 2 - im Anhang).

3.2.2.2 Herstellung der gelöteten Prüfkörper

Die für eine Verlötung vorgesehenen Prüfkörper wurden in der Mitte markiert und dort mit einer Trennscheibe durchtrennt.

Von elf Prüfkörpern wurden die Hälften einzeln mit der Trennstelle nach oben in einen Lötblock aus Hochtemperatureinbettmasse (Fa. Röhrich) gebracht. Nach Lufttrocknung und Vorwärmen (300 °C) des Blockes im Ofen wurden die vorzuschwemmenden Flächen mit dem Flußmittel Fluxol (Fa. Bego) beschickt und mit einem in das Flußmittel getauchten Stück Weißgoldlot-1 belegt. Das Durchwärmen und Erhitzen auf die Arbeitstemperatur (1020 °C) geschah mittels eines Mikroflammenlötgerätes, Modell

Multiplex. Die langsam abgekühlten Prüfkörperhälften wurden ausgebettet, in Aurocid abgesäuert und von Lotüberschüssen befreit. Da das Lot nach dem Erstarren ein konvexe Oberfläche hatte (Abb. 3 - im Anhang), mußten die späteren Lötspaltwände plangeschliffen werden.

Mit Hilfe einer selbstgefertigten Kunststofform (Abb. 4 - im Anhang) wurden jeweils zwei Prüfkörperhälften axial an der Trennstelle adaptiert. Eine eingelegte Platinfolie von 0,02 mm Stärke sicherte eine minimale Lötspaltbreite. Die Sicherung dieser Position erfolgte durch einen an beiden Prüfkörperhälften mit Palavit G fixierten Draht (Abb. 5 - im Anhang) und Übertragung in einen Lötblock aus Hochtemperatureinbettmasse (Fa. Röhrich). Rosa Modellierwachs verhinderte das Eindringen von Einbettmasse in den Lötspalt; es wurde nach dem Abbinden ausgebrüht.

Für die Flammlötung mit Wironlot wurden die luftgetrockneten Lötblöcke nach dem Auftrag von Flußmittel (Fluxol) im Ofen auf 600 °C vorgewärmt. Dann erfolgte nach Applikation eines mit Flußmittel überzogenen Lotstreifens auf den Lötspalt das weitere Erhitzen bis zum Verschießen des Lotes mit dem Lötbrenner.

Die Ofenlötungen erfolgten in einem Vita-Inframat-Keramikbrennofen.
Die Lötblöcke wurden auf 300 °C vorgewärmt und dann der Lötspalt mit dem Flußmittel Minoxyd (Fa. Bego) beschickt. Das Lot wurde in Minoxyd getaucht, über der Flamme kugelig angeschmolzen und auf den Lötspalt gelegt. Goldlot-1 für die mit Weißgold vorgeschwemmten Teile, WGL-Lot für die direkte Lötung.
Die Temperaturführung des Ofens für die anschließende Lötung war für

Goldlot-1: 5 min. 300 °C, Temperatur auf 800 °C erhöhen, 2 min. halten, auf 850 °C hochfahren, 1 min. halten, langsam abkühlen.

WGL-Lot: 5 min. 300 °C, Temperatur auf 800 °C erhöhen, 2 min. halten, auf 850 °C hochfahren, 1 min. halten, langsam abkühlen.

Nach dem Löten wurden die Prüfkörper ausgebettet und in Aurocid abgesäuert. Die Ausarbeitung der Lötstellen erfolgte mit feinen Steinchen und Poliergummis. Fertige Prüfkörper nach verschiedenen Lötungen zeigt Abb. 6 im Anhang.

3.2.3 Versuchsdurchführung

3.2.3.1 Zugversuche

Zugversuche sind eine Standardmethode der Werkstoffprüfung.
Durchgeführt wurden die Versuche in einer Instron-Universalprüfmaschine mit einem Meßbereich bis maximal 49 033 N. Bei einem Traversenvorschub von 2 mm/min. wurden die Zugkraft in der Senkrechten, die Längenzunahme der Probe in der Waagerechten über einen Schreiber aufgezeichnet.

Die Proben wurden mit ihren breiten Enden in die Spannzangen der Maschine eingelegt (Abb. 7 - im Anhang) und dann bis zum Bruch des Materials einer gleichmäßig gesteigerten Zugbeanspruchung nach DIN 50 145 unterworfen. Die Proben wurden gedehnt. Bis zu einem bestimmten, materialspezifischen Wert ist diese Längenänderung der angreifenden Kraft proportional. Jenseits dieses Wertes erfolgt eine überproportionale Verlängerung, die kurz vor dem Zerreißen des Prüfkörpers stark ansteigt.

In der Proportionalitätszone ist die Verformung reversibel, d.h. der Prüfkörper stellt sich nach dem Wegfall der Zugkrafteinwirkung in seine Ausgangsform zurück. Man spricht von elastischer Verformung. Im Kraft-Verlängerungsdiagramm (Abb. 8) erscheint dieser Bereich als Gerade (Hook'sche Gerade).

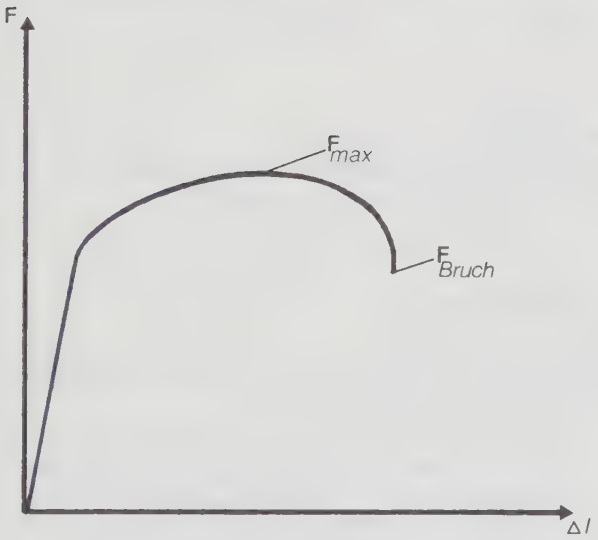


Abb. 8: Kraft-Verlängerungsdiagramm
F = einwirkende Kraft
Δl = Längenänderung des Prüfkörpers

Der Verlauf der Kurve beschreibt die überproportionale Dehnung. Das elastische Rückstellvermögen besteht hier nicht mehr; die Verformung erfolgt dauerhaft, "plastisch", bis es zum Zerreißen kommt.

Die Auswertung der aufgezeichneten Kraft-Verlängerungsdiagramme ist nur von begrenztem Wert, da es sich bei den gelöteten Prüfkörpern nicht um einheitliche Materialien handelt, und es somit zu einer Überlagerung verschiedener, für die jeweiligen Materialien (Grundwerkstoff, Lote, Legierungen der Diffusionszonen) spezifischer Werte kam, die nur schwer voneinander zu trennen sind.

Es wurden jeweils 10 Zugversuche an vier verschiedenen Prüfkörpertypen durchgeführt:

1) Wiron 88 ungelötet
2) Wiron 88 gelötet mit Wironlot
3) Wiron 88 gelötet mit Goldlot-1 nach Vorschwemmen mit Weißgoldlot
4) Wiron 88 gelötet mit WGL-Lot, direkt

3.2.3.2 Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der 40 Versuche sind in Tabelle 7 zusammengefaßt und in Abb. 9 graphisch dargestellt.

	1	2	3	4
	527	464	402	506
	555	416	458	437
	548	451	513	464
	555	458	485	485
	569	444	534	326
	527	353	360	423
	569	416	423	416
	534	576	430	680
	534	478	347	416
	513	423	458	367
$\bar{x}$	543	448	441	452
s	19	57	61	96
v	3,5 %	12,8 %	14 %	21,2 %

Tab. 7: Zugfestigkeiten der 40 Prüfkörper in N/mm²

Spalte 1: Prüfkörper, ungelötet

Spalte 2: Prüfkörper nach Lötung mit Wironlot

Spalte 3: Prüfkörper nach Vorschwemmen mit Weißgoldlot und Lötung mit Goldlot-1

Spalte 4: Prüfkörper nach Lötung mit WGL-Lot, direkt

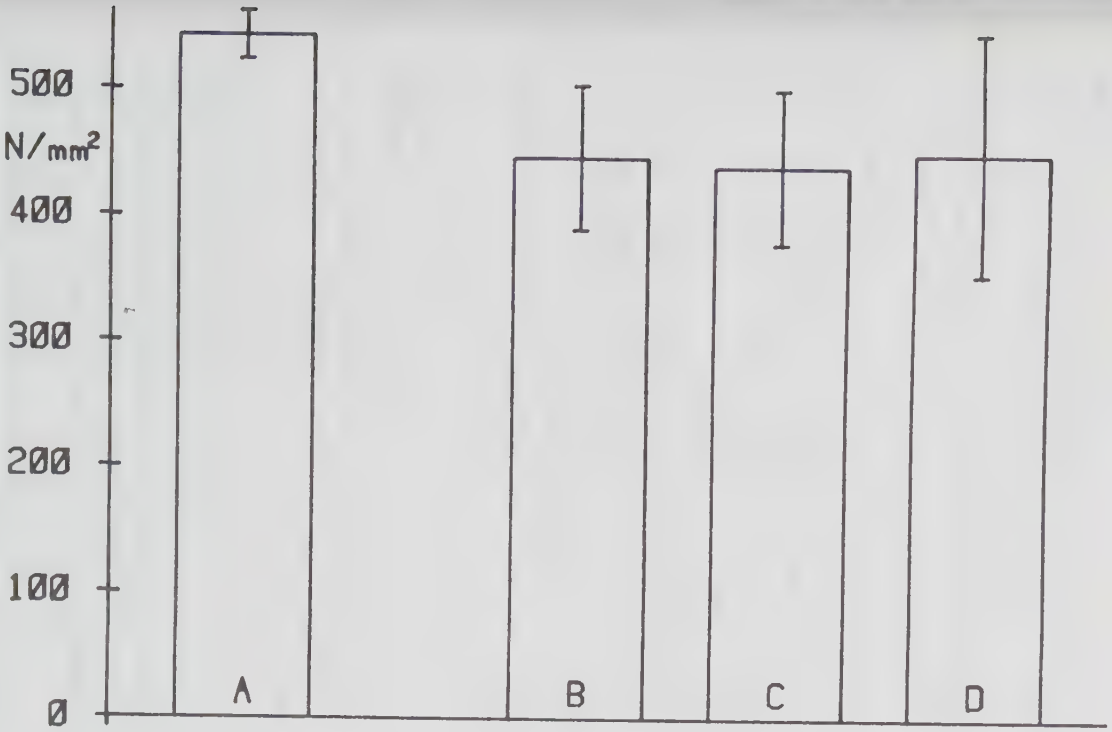


Abb. 9: Graphische Darstellung der Zugfestigkeiten
(arithmetische Mittel und Standardabweichungen)

A: Wiron, ungelötet
B: Wironlot
C: Goldlot, vorgeschwemmt
D: WGL-Lot, direkt

In Spalte 1 von Tabelle 7 sind die Zugfestigkeitswerte der ungelöteten Proben angegeben. Sie liegen um einen Mittelwert $\bar{x}$ von 543 N/mm² mit einer Standardabweichung s von 19 und einem Variationskoeffizienten v von 3,5 %.
Der wahre Mittelwert liegt mit 95 %iger Wahrscheinlichkeit zwischen 530 und 557 N/mm².

Die Werte in Spalte 2 wurden an den mit Wironlot über der Flamme gelöteten Prüfkörpern gewonnen. Es ergibt sich ein Mittelwert von 448 N/mm² mit einer Standardabweichung von 57 N/mm² und einem Variationskoeffizienten von 12,8 %. Der wahre Mittelwert liegt mit 95 %iger Wahrscheinlichkeit zwischen 407 und 489 N/mm².

Spalte 3 gibt die Zugfestigkeitswerte der mit Weißgoldlot vorgeschwemmten und mit Goldlot-1 im Ofen gelöteten Prüfkörper wieder. Bei einem Mittelwert von 441 N/mm² ergibt sich eine Standardabweichung von 61 N/mm² und ein Variationskoeffizient von 14 %.
Der wahre Mittelwert liegt mit 95 %iger Wahrscheinlichkeit zwischen 397 und 485 N/mm².

Die Zugfestigkeitswerte der mit WGL-Lot im Ofen gelöteten Proben sind in Spalte 4 aufgeführt. Der Mittelwert ist 452 N/mm². Die Standardabweichung beträgt 96 N/mm², der Variationskoeffizient 21,2 %.
Der wahre Mittelwert liegt mit 95 %iger Wahrscheinlichkeit zwischen 383 und 520 N/mm².

An den Proben 1,4 und 6 der Wironlotreihe und an der Probe 1 der Weißgold/Goldlot-Reihe waren an der Rißstelle deutlich Lunker zu erkennen. Sie wurden dennoch nicht aus der Wertung ausgeschlossen, da sie keine wesentlich geringere Festigkeit hatten als einige der übrigen Proben ohne sichtbare Mängel.

Es besteht kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den mit den verschiedenen Verfahren erzielten Zugfestigkeiten. Signifikant ist

nur der Unterschied zwischen den gelöteten Proben auf der einen und den ungelöteten auf der anderen Seite.

Das Verfahren der direkten Ofenlötung mit WGL-Lot zeigt eine erheblich größere Streuung der Werte als die anderen beiden Verfahren, deren Variationskoeffizienten auch noch beachtlich hoch sind.

3.3 Metallographische Untersuchungen

Die Metallographie ist ein Spezialgebiet der Metallkunde, das sich mit den Zusammenhängen zwischen Zustandsdiagrammen, Gefügestrukturen und Stoffeigenschaften befaßt (26). Die mikroskopische Betrachtung von Metallproben, sowohl im Licht- als auch im Elektronenmikroskop, ist die wichtigste Methode zur Untersuchung von Gefügestrukturen. Das Auflichtmikroskop und das Rasterelektronenmikroskop (REM) sind dabei die üblichen Geräte, da bei ihrer Verwendung die komplizierte Herstellung "durchstrahlbarer" Proben entfällt.

3.3.1 Herstellung der Proben

Die Proben müssen plangeschliffen, poliert und für die Betrachtung unter dem Lichtmikroskop oberflächlich angeätzt werden.
Die Oberflächen der in verschiedenen Raumrichtungen orientierten Kristallite der Probe werden durch das Ätzmittel verschieden stark angegriffen, wie auch Bereiche verschiedener stofflicher Zusammensetzung (z.B. Korngrenzenausscheidungen). Daraus ergibt sich eine unterschiedliche Reflexion des auffallenden Lichtes, die vom Betrachter mit verschiedenen Helligkeitswerten wahrgenommen wird. Es wird je nach dem Differenzierungsmuster zwischen Korngrenzen- und Kornflächenätzung unterschieden.

Die für bestimmte Materialien geeigneten Ätzmittel können aus entsprechenden Tabellen der Fachliteratur entnommen werden (26). Im Falle der

vorliegenden Untersuchungen müssen allerdings zunächst die notwendige Ätzzeit, -temperatur und -verdünnung durch Probieren mit mehrmaligem Zwischenpolieren herausgefunden werden.

Das Rasterelektronenmikroskop hat gegenüber dem Lichtmikroskop eine größere Tiefenschärfe und ein besseres Auflösungsvermögen. Es sind Vergrößerungen bis zu 30000:1 möglich, im Gegensatz zum Lichtmikroskop mit maximalen Vergrößerungen von 1500:1.

Ein weiteres wichtiges Hilfsmittel metallographischer Untersuchung ist die Elektronenmikrosonde, die in Verbindung mit dem REM eingesetzt werden kann. Sie ermöglicht die quantitativ chemische Untersuchung mikroskopisch kleiner Bezirke einer Probe.

Ein über die Probe geführter gebündelter Elektronenstrahl regt die oberflächlichen Atome in einem Bereich von ca. 1 µm Durchmesser zur Emission charakteristischer Röntgenstrahlung an. Diese wird wellenlängen- oder energiedispersiv analysiert (15), (24).

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurde der Bereich der Lötstelle in einer Breite von ca. 7 mm aus dem Prüfkörper herausgetrennt und, um die folgenden Arbeitsgänge zu erleichtern, in Kunststoff eingebettet. Die Proben durften beim Schneiden nicht erwärmt werden, um artifizielle Gefügeänderungen zu vermeiden.

Das Schleifen der eingebetteten Proben erfolgte auf Naßschleifpapier von zunehmend feinerer Körnung (320, 400, 600, 1000 µm) unter Wasserkühlung. Beim Übergang zu einer feineren Körnung mußten die Proben gründlich gereinigt werden, um keine größeren Partikel in den neuen Schleifvorgang zu verschleppen. Bei jedem Schleifvorgang wurde die Probe um 90° gegenüber ihrer Stellung während des vorherigen Durchganges gedreht und bearbeitet, bis die Spuren des gröberen Schleifpapiers entfernt waren.

Poliert wurden die Proben mit Diamantstaubpasten der Körnung 3 µm und 1 µm auf einer Kunststoffvliesunterlage. Nach Reinigung mit Wasser und Äthylalkohol kamen folgende Ätzmittel zur Anwendung:

1. Königswasser 2ml konzentrierte Salpetersäure und
   6ml konzentrierte Salzsäure

für die mit Weißgoldlot vorgeschwemmte und mit Goldlot-1 gelötete Probe.
Bei 30 °C wurde zunächst 20 s lang geätzt, dann zwischenpoliert und dann nochmals für 20 s geätzt.

2. Königswasser verdünnt 2ml konzentrierte Salpetersäure,
   6ml konzentrierte Salzsäure und
   3ml Glycerin

für die mit WGL-Lot gelötete Probe.
Bei Zimmertemperatur wurde 2 min. lang geätzt, dann zwischenpoliert und dann nochmals für 1 min. geätzt.

3. Murakami-Ätzung 10ml Aqua dest.,
   1g Kaliumhydroxid und
   1g Kaliumhexacyanoferrat III

für die mit Wironlot gelötete Probe.
Bei 60 °C wurde 10 min. lang geätzt.

Für die Untersuchungen im Rasterelektronenmikroskop und mit der Mikrosonde wurden die Proben wie oben beschrieben poliert und mit einer Graphitschicht (25 nm) bedampft.

Mit der Mikrosonde wurden die Proben in einer Serie von Messungen wellenlängendispersiv untersucht. Die Meßpunkte für die durchgeführten "line-scans" lagen auf einer Linie quer zum Verlauf des Lötspaltes. Zusatzlich wurden Punktanalysen an unter dem REM wichtig erscheinenden Stellen durchgeführt.

Durch eine geringere Bündelung des Elektronenstrahles wurden auch einige Analysen über eine größere Fläche integriert erstellt.

Probe 1 (Wiron 88, gelötet mit Wironlot) wurde in 20 Schritten mit einer Schrittweite von 50 µm jeweils auf einer Fläche von 20 mal 20 µm vom Grundmaterial über den Lötspalt zum Grundmaterial abgetastet.

An Probe 2 (WGL-Lot) erfolgte die Abtastung vom Lötgut bis zur Mitte des Lötspaltes in 40 Schritten mit einer Schrittweite von 5 µm jeweils auf einer Fläche von 5 mal 20 µm, die Längsseite der Fläche parallel zum Lötspaltverlauf.

Probe 3 (Weißgold-/Goldlot) wurde mit 50 Schritten ebenso wie Probe 2 untersucht.

Die Ergebnisse der Mikrosondenuntersuchung konnten in Beziehung zu den BEGO-Werksangaben (Tab. 1, 3 bis 6) über die Zusammensetzung der unverarbeiteten Werkstoffe gesetzt werden.

Der Sichtbarmachung der relativen Verteilung eines Elementes auf einer größeren Fläche dienen die sogenannten Verteilungsbilder. Bei diesem Vorgehen wird die untersuchte Fläche zeilenweise mit dem Elektronenstrahl abgetastet und die Intensität der für das jeweilige Element charakteristischen remittierten Strahlung an den einzelnen Orten gemessen und aufgezeichnet.

3.3.2 Betrachtung unter dem Auflichtmikroskop

Die Verbindung der NEM-Legierung Wiron 88 durch Flammlötung mit Wironlot in Probe 1 (Abb. 10) zeigt bei 225-facher Vergrößerung eine Verschmelzung der Gefügestrukturen zwischen Lot und Grundmaterial. Es ist keine klare Grenze zu erkennen. Der Bereich des Lotes hebt sich nur

durch eine größere Zahl von interkristallinen Ausscheidungen ab. Bis auf einen großen Lunker zeigen sich in der Schnittebene keine Porositäten.

Abb. 11a und b zeigen die mit WGL-Lot im Ofen direkt gelötete Probe 2 bei 225- und 450-facher Vergrößerung im Lichtmikroskop. Hier ist es zur Ausbildung einer deutlich sichtbaren Grenzschicht zwischen Lot und Lötgut gekommen. Verbindungen der verschiedenen Zonen untereinander sind nicht erkennbar.

Bei der mit Weißgoldlot vorgeschwemmten und mit Goldlot im Ofen gelöteten Probe 3 (Abb. 12) ist bei 450-facher Vergrößerung eine klare Trennung in drei Zonen - Grundmaterial und zwei Lote - zu erkennen. Der Bereich des Weißgoldlotes wird durch das Ätzmittel am stärksten angegriffen. Durchmischungen der Materialien sind nicht sichtbar.

3.3.3 Betrachtung mit dem Rasterelektronenmikroskop und Vergleich mit Mikrosondenuntersuchung

Probe 1 (Flammlötung von Wiron 88 mit Wironlot):
Das REM zeigt bei 600-facher Vergrößerung (Abb. 13) der Probe 1 zur Mitte des Lötspaltes hin eine Verdichtung von interkristallinen Ausscheidungen, die auch Abb. 14 im Ausschnitt bei 4000-facher Vergrößerung wiedergibt.

In den Verteilungsbildern für die Elemente Si, Mo, Cr, Ni und Fe sind die auf den REM-Aufnahmen sichtbaren Strukturen teilweise wiederzuerkennen (Abb. 14a bis f).

In den sich hell darstellenden Bereichen der interkristallinen Strukturen sind auf den Verteilungsbildern Anreicherungen von Si (Abb. 14a), Mo (Abb. 14b) und teilweise Cr (Abb. 14c) zu sehen sowie eine Verarmung an Ni (Abb. 14d) und Fe (Abb. 14e). Die Punktanalyse weist das gleiche Ergebnis auf (Tab. 11).

In den schwarz erscheinenden Zonen ist eine Verarmung an Si, Co und Cr in der Punktanalyse (Tab. 12) meßbar, nicht aber auf den Verteilungsbildern (Abb. 14a, c, f) sichtbar.

Abb. 14g zeigt einen Ausschnitt aus dem Grundwerkstoff Wiron 88 nach einmaligem Vergießen bei 4000-facher Vergrößerung. Die Punktanalyse der Ausscheidungen ergibt hier für die hellen Bereiche eine Anreicherung von Si und Mo sowie eine Verarmung an Ni und Cr (Tab. 13). Die schwarzen Bereiche zeigen kaum Abweichungen gegenüber den Angaben des Herstellers in Bezug auf die Legierungszusammensetzung des Wiron 88.

Die line-scan-Untersuchung der Probe 1 zeigt für einige Elemente (Si, Al, Fe) eine gleichmäßige Verteilung über die Untersuchungsstrecke. In Tab. 14 sind die Werte von Mo, Co, Cr angegeben, für die deutliche Konzentrationsunterschiede meßbar sind. An den Materialgrenzen Lot/Grundwerkstoff sind keine Konzentrationssprünge, wie sie der Zusammensetzung der Ausgangsmaterialien entsprechen würden, festzustellen, sondern ein kontinuierlicher Anstieg bzw. Abfall der Konzentrationen. Dies deutet auf umfangreiche Diffusionsprozesse hin.

*****

Alle Tabellen mit Mikrosondenmeßwerten sind Ausschnitte aus Untersuchungen, die sich auf eine größere Anzahl von Elementen erstreckten und/oder mehr Meßpunkte berücksichtigten.
Die Gew.-Prozent-Angaben sind nicht immer auf 100 % bezogen, bedingt durch den Meßfehler und das Fehlen einer Angabe für Sauerstoff.

Pos.	Si	Mo	Ni	Co	Cr	Fe
1	5,4009	29,3947	40,4125	0,8785	22,3967	0,5389
2	5,6534	25,3487	43,8020	1,0272	22,3967	0,5666
$\bar{x}$	5,5271	27,3717	42,1073	0,9528	22,3967	0,5528
s	0,1785	2,8610	2,3967	0,1052	0,4606	0,0196

Tab. 11: Mikrosondenmessung an zwei im REM-Bild hell erscheinenden Ausscheidungsstellen im Wironlot nach Lötung von Wiron 88, Angabe in Gew.-Prozent

Pos.	Si	Co	Cr
1	1,9575	1,6881	16,5101
2	1,9819	1,7057	17,0159
$\bar{x}$	1,9697	1,6969	16,7630
s	0,0173	0,0124	0,3576

Tab. 12: Mikrosondenmessung an zwei im REM-Bild dunkel erscheinenden Ausscheidungsstellen im Wironlot nach Lötung von Wiron 88, Angabe in Gew.-Prozent

Pos.	Si	Ni	Mo	Cr
1	5,8367	28,9212	43,4068	16,6278
2	5,7015	32,4957	41,3760	16,6503
$\bar{x}$	5,7691	30,7084	42,3914	16,6390
s	0,0956	2,5276	1,4360	0,0159

Tab. 13: Mikrosondenmessung an zwei im REM-Bild hell erscheinenden Ausscheidungsstellen im Wiron 88 nach einmaligem zahntechnischen Vergießen, Angabe in Gew.-Prozent

1	10,0727	0,1663	23,4637
2	9,2390	0,1756	23,8774
3	9,0324	0,4624	22,4051
4	7,9640	1,0143	20,4273
5	6,2168	1,4215	19,8864
6	4,8724	1,8646	18,4226
7	5,1676	2,1380	18,0596
8	6,6772	2,0714	19,3125
9	4,5494	2,1333	18,7947
10	6,7063	2,0748	19,3026
11	5,7050	1,6018	18,6149
12	6,6908	1,1875	20,5295
13	7,9209	0,8603	20,6916
14	8,4917	0,4444	21,9703
15	8,3051	0,2220	22,8402
16	9,1665	0,1372	23,5059
17	10,7528	0,1655	23,8703
18	10,9409	0,1705	23,9208
19	9,7781	0,1238	24,2849
20	10,0379	0,1742	23,6313
$\bar{x}$	7,9144	0,9305	21,3906
s	1,9906	0,8040	2,1983

Tab. 14: Line-scan-Untersuchung über die Lötnaht Wiron 88/Wironlot der Probe 1, Angabe in Gew.-Prozent

Probe 2 (Ofenlötung von Wiron 88 mit WGL-Lot):
Bei 4000-facher Vergrößerung (Abb. 15a und b) zeigt sich eine scharfe Abgrenzung von Schichten, innerhalb derer noch Inhomogenitäten erkennbar sind.
Die Grenzschicht am Übergang zum Grundmaterial zeigt im Verteilungsbild (Abb. 15c) eine starke Anreicherung an Sauerstoff. Sie kann als Oxidschicht gedeutet werden. Eine zweite sauerstoffreiche Schicht findet sich ca. 20 bis 30 µm weit im Innern des Lotes.
Die gegenüber dem Innern des Grundmaterials erkennbare Verarmung an Cr (Abb. 15d) und Ni (Abb. 15e) in der Grenzschicht muß auf die Sauerstoffanreicherung zurückgeführt werden.

Die Verteilungsbilder für Zn (Abb. 15f), Ag (Abb. 15g), Au (Abb. 15h), Mo (Abb. 15i) und Cu (Abb. 15k) machen deutlich, daß es trotz der Oxidschicht zu Diffusionsprozessen zwischen Lot und Lötgut gekommen ist. Im Lot entsteht eine zinkarme Zone zugunsten eines Übertritts von Zn in das Grundmaterial. Das gleiche ist für Ag und Cu erkennbar, wenn auch in geringerem Maße. Cr und Mo (Abb. 15i) aus dem Lötgut Wiron 88 haben sich fast gleichmäßig im Lot verteilt.
30 bis 60 µm vom Rand des Lötspaltes entfernt ist eine deutlich abgegrenzte Zone mit Au-Anreicherung und Ag-, Zn-, Ni- und Cu-Verarmung erkennbar. Die in diesem Bereich gewonnenen Mikrosondenmeßwerte entsprechen dieser Feststellung (Tab. 15).

Im line-scan für die Elemente Ag, Mo, Au, Zn, Cu, Ni, Co, Fe und Cr sind keine scharfen Grenzen zwischen Bereichen unterschiedlicher Konzentration zu erkennen. Es hat sich im Grenzbereich der Materialien ein gleichmäßiges Konzentrationsgefälle auf einer für die einzelnen Elemente unterschiedlichen Breite ausgebildet.
Die Materialgrenze liegt etwa zwischen dem 20. und 21. Schritt des scans. Dieser Bereich ist in Tab. 16 angegeben.

Pos.	Ag	Au	Zn	Cu	Ni
1	10,0224	80,1470	2,7245	0,6586	2,0534
2	8,2785	80,7433	2,4121	0,4680	1,5133
3	8,7946	84,0945	2,3542	0,5370	1,4662
$\bar{x}$	9,0318	81,6619	2,4970	0,5545	1,6777
s	0,8959	2,1285	0,1992	0,0965	0,3263

Tab. 15: Mikrosondenmessung an drei Stellen der in Abb. 15a markierten Zone des WGL-Lotes, Angabe in Gew.-Prozent

Probe 3 (Ofenlötung von Wiron 88 mit Goldlot nach Vorschwemmen mit Weißgoldlot):
Die REM-Aufnahme (Abb. 16a) bei 4000-facher Vergrößerung zeigt eine klare Abgrenzung von drei Materialbereichen, wobei der mittlere Bereich dem Weißgoldlot entspricht und in sich inhomogen strukturiert ist. Auf der dem Goldlot zugewandten Seite sind diese Inhomogenitaten feiner verteilt.

Die schwarz erscheinenden Bereiche sind, wie aus den Verteilungsbildern (Abb. 16b bis i) erkennbar ist, Cr-, Mo-, Ni-reich und Au-, Zn-, Ag-, Pd-, Cu-arm. Für Ag ist das Bild nicht eindeutig, jedoch wird diese Interpretation von der Punktanalyse (Tab. 17) bestätigt.

Die sich dunkelgrau darstellenden Bereiche sind Ni-, Mo-reich, sowie Pd-, Au-, Cr-arm. Für diese Feststellung müssen ebenfalls die Verteilungsbilder und die Punktanalysen (Tab. 18) gemeinsam betrachtet werden.

Si, für das kein Verteilungsbild angefertigt wurde, zeigt der Punktanalyse zufolge in den schwarzen Bereichen eine Anreicherung und in den dunkelgrauen Zonen eine Verarmung.

Pos.	Ag	Mo	Au	Zn	Cu	Ni	Co	Fe	Cr
1	0,0000	12,9502	0,0000	0,0000	0,0000	57,3442	0,1303	1,5689	23,5428
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
12	0,0000	10,3735	0,0000	0,0280	0,0000	58,9653	0,1522	1,8331	23,4889
13	0,1062	9,4303	0,0302	0,0000	0,0000	60,6317	0,1592	1,9875	23,5016
14	0,0398	8,5143	0,3304	0,0000	0,0000	61,3141	0,1536	1,9723	23,3396
15	0,1622	10,6650	0,2017	0,0222	0,0000	60,2509	0,1737	1,8728	23,7955
16	0,0000	9,5240	0,0000	0,0585	0,0163	61,0587	0,1478	1,9293	24,2558
17	0,0000	9,2655	0,1774	▶ 0,0113	0,0099	59,7466	0,1357	1,8748	23,9887
18	▶ 0,1095	▶10,0010	0,1432	0,1016	0,0000	▶59,5769	▶ 0,1233	▶ 1,7725	▶23,5640
19	0,0268	3,5381	▶ 0,1834	4,2901	▶0,0153	37,9061	0,0741	1,2356	11,7662
20	4,1500	2,4798	16,4536	3,8224	0,1913	13,0052	0,0024	0,5597	2,1652
21	▶13,6591	▶ 0,8675	64,9685	▶ 9,1495	▶1,7933	4,6684	▶ 0,0000	0,1436	0,4164
22	13,3166	0,3902	65,2878	10,7279	2,0373	3,9833	0,0131	▶ 0,0601	▶ 0,0985
23	11,8041	0,6100	▶71,3346	8,3956	1,5162	▶ 2,8448	0,0000	0,0383	0,0771
24	9,6425	0,1552	73,3237	7,4836	1,2691	2,2654	0,0000	0,0000	0,0706
25	9,4501	0,1865	74,4717	7,1835	1,2558	2,0297	0,0000	0,0280	0,0364
26	12,1343	0,1847	67,9292	10,2107	1,7334	3,3686	0,0000	0,0000	0,0412
27	10,7493	0,2478	69,5234	8,8789	1,4861	2,6619	0,0285	0,0400	0,0843
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
40	12,3057	0,5330	65,7963	9,8547	1,9818	4,1328	0,0283	0,0226	0,0845
$\bar{x}$	6,2540	4,8378	34,0931	5,1818	0,8625	29,7739	0,0724	0,8987	11,0601
s	6,1702	4,7493	33,7772	4,9625	0,8706	27,8124	0,0750	0,9126	11,2768

Tab. 16: Line-scan über die Lötnaht Wiron 88/WGL-Lot, Angabe in Gew.-Prozent

Pos.	Si	Ag	Pd	Mo	Au	Zn	Cu	Ni	Cr
1	4,9404	1,1030	0,6557	40,2703	11,8229	0,4167	2,4336	22,8755	10,6426
2	6,1135	0,4900	0,2044	45,7321	5,6826	0,1855	0,9757	26,1651	14,0854
$\bar{x}$	5,5269	0,7965	0,4300	43,0012	8,7528	0,3011	1,7046	24,5203	12,3640
s	0,8295	0,4334	0,3191	3,8621	4,3419	0,1635	1,0309	2,3261	2,4345

Tab. 17: Mikrosondenmessung an zwei im REM-Bild schwarz erscheinenden Ausscheidungsstellen im Weißgoldlot, Angabe in Gew.-Prozent

Pos.	Si	Pd	Mo	Au	Ni	Cr
1	0,8128	2,1470	6,5928	53,8016	8,9270	1,2937
2	0,1399	2,9595	1,1212	64,1004	4,5704	1,4754
$\bar{x}$	0,4764	2,5532	3,8570	58,9510	6,7487	1,3846
s	0,4758	0,5745	3,8690	7,2824	3,0806	0,1285

Tab. 18: Mikrosondenmessung an zwei im REM-Bild dunkelgrau erscheinenden Ausscheidungsstellen im Weißgoldlot, Angabe in Gew.-Prozent

Cr, Ni, und Fe (Abb. 16k) sind, aus dem Grundmaterial Wiron 88 stammend, fast gleichmäßig in beiden Loten verteilt. Mo ist hauptsächlich auf den Bereich des Weißgoldlotes beschränkt. Ag, Zn, Cu, Sn (Abb. 16l), Pd und Au sind in deutlich sichtbarem Ausmaß in das Grundmaterial übergetreten, was auch aus der line-scan-Untersuchung (Tab. 19a und b) zu entnehmen ist. Diese zeigt die Materialgrenze Wiron 88/Weißgoldlot zwischen dem 25. und 26. Schritt sehr deutlich. Eine zweite unscharfe Grenze zwischen den Loten könnte sich aus den Werten für Si, Mo und Cu ergeben (36., 37. und 38. Schritt).

Pos.	Si	Ag	Mo	Au	Sn	Pd
1	1,3378	0,0000	9,6630	0,0489	0,0687	0,0774
.	.	.	.	.	.	.
21	1,4946	0,0517	9,5794	0,0000	0,0000	0,0289
22	1,6289	0,0000	10,4937	0,2267	0,0000	0,0581
23	1,5751	0,1285	9,5316	0,0000	0,0000	0,1156
24	1,3294	0,1729	9,8010	2,0627	0,0248	0,1071
▶25	1,1488	0,4353	9,5326	3,9525	0,1205	0,1865◀
▶26	0,5439	5,0506	6,1915	55,0914	1,0611	3,5672◀
27	0,5734	6,3063	5,7173	62,8515	1,4955	3,8465
28	0,5339	6,1175	5,4606	62,3374	1,4840	3,4777
29	0,5640	6,1960	5,2855	62,9544	1,4139	3,5556
30	0,5013	7,0099	5,1542	62,1926	1,7191	3,3941
31	0,4121	7,3209	4,0016	63,0846	1,5641	3,0473
32	0,2110	7,6497	1,9547	66,0541	2,0634	3,0579
33	0,3017	6,4536	2,4776	63,1170	1,6610	2,9506
34	0,3296	6,1571	2,5056	63,7659	1,7110	3,5746
35	0,8895	7,0521	8,0073	58,8978	1,7407	2,9800
36	▶0,0758	5,7913	8,9170	58,5699	1,5207	2,8775
37	0,3387	6,8750	▶ 3,7620	63,9696	1,4126	3,5276
38	0,0597	5,9695	0,6495	66,8199	1,8056	3,2661
39	0,1312	6,3394	2,8642	64,2462	1,4249	3,9460
40	0,0293	6,0723	0,3405	68,3135	0,8923	4,0218
41	0,0128	5,6680	0,0000	68,5701	1,1748	4,4763
.	.	.	.	.	.	.
50	0,0285	8,3603	0,0000	68,0416	1,7399	3,5059
$\bar{x}$	0,8208	3,3906	6,1873	32,6569	0,7524	1,8153
s	0,6147	3,4008	4,2179	32,8077	0,7550	1,8019

Tab. 19a: Line-scan-Untersuchung über die Lötnaht Wiron 88/Weißgold-/Goldlot, Angabe in Gew.-Prozent

Pos.	Cu	Ni	Fe	Cr	Zn
1	0,0000	60,7011	1,9360	24,1582	0,0436
.	.	.	.	.	.
21	0,0046	61,0302	1,9182	23,9025	0,0000
22	0,0000	60,9725	1,9095	23,9266	0,0039
23	0,0000	60,2424	1,8595	23,5133	0,0263
24	0,1536	58,5532	1,8816	23,6160	0,0847
25	0,4281	57,4594	1,6189	22,1338	0,1292
26	7,6677	13,2994	0,4838	4,7984	1,3383
27	8,6856	8,0131	0,2192	2,1357	1,4328
28	8,5676	6,8568	0,2000	1,7726	1,2804
29	8,8575	6,8528	0,1639	1,9061	1,4274
30	8,3476	6,2237	0,1738	1,2600	1,3458
31	8,6582	5,7721	0,1785	1,2120	1,4623
32	9,1627	4,6474	0,1160	1,2755	1,5499
33	8,5316	5,2576	0,1069	1,5836	1,4532
34	9,0884	5,6634	0,1677	1,6300	1,7098
35	8,0838	7,2357	0,1232	2,5615	1,3327
36	8,0296	7,9304	0,1540	2,7258	1,4502
37	8,2470	5,5892	0,1550	2,0280	1,5703
38	▶ 9,1200	3,9725	0,0931	1,3108	1,5384
39	9,1007	4,7277	0,1571	1,9847	1,5353
40	9,6381	3,8326	0,1403	1,7859	1,6308
41	9,5836	4,0759	0,1717	1,9912	1,4125
.	.	.	.	.	.
50	9,9658	3,2854	0,1188	1,1029	1,6744
$\bar{x}$	4,5715	32,9564	1,0249	12,7881	0,7746
s	4,6173	28,0331	0,8795	11,1574	0,7646

Tab. 19b: Line-scan-Untersuchung über die Lötnaht Wiron 88/Weißgold-/ Goldlot, Angabe in Gew.-Prozent

4 DISKUSSION

Die Frage, ob es sich beim "Löten" von Nichtedelmetall-Legierungen um eigentliche Lötungen oder um Klebungen handelt, kann, zumindest für die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Werkstoffe und Methoden, zugunsten der Lötung entschieden werden.

Wie aus den mikroskopischen Bildern und den Mikrosondenuntersuchungen hervorgeht, ist der Umfang der ablaufenden Diffusionsprozesse recht erheblich. An diesen Vorgangen sind verschiedene Elemente beteiligt. Besonders deutlich wird dies auf den Verteilungsbildern für die Elemente, die ursprünglich nur in einem der Ausgangsmaterialien vorhanden waren, so z.B. Silber im Lot und Molybdän im Grundwerkstoff. Es finden sich Elemente aus dem Lot im Grundwerkstoff und umgekehrt.
Diffusion findet in beiden Richtungen statt. Sie beschränkt sich nicht nur auf den engsten Grenzbereich an der Kontaktstelle der Werkstoffe, sondern ist auch noch bis zu 60 µm tief im Innern der Materialien erkennbar.

Es scheint bei der Flammlötung möglich zu sein, eine Oxidation der Nichtedelmetalle mit geeigneten Flußmitteln zu vermeiden. Weshalb es bei der direkten Ofenlötung zu der starken Oxidation kommt, ist unklar. Es könnte mit der gegenüber der Flammlötung verlängerten Erhitzungszeit zusammenhängen.

Auffallend ist, daß es bei der WGL-Lötung trotz der Oxidbildung noch zu erkennbaren Diffusionsprozessen in beiden Richtungen kommt. Die besonders breite Streuung der Festigkeiten dieser Lötungen hängt möglicherweise von jeweils unterschiedlich starken Oxidschichten ab.

Im Mittel entsprechen die mit den Lötungen erzielten Festigkeiten den klinischen Erfordernissen. Wegen der breiten Streuung der Festigkeitswerte sollten die Verbindungsquerschnitte sicherheitshalber überdimensioniert werden.

Die in der Folge der Diffusionsprozesse auftretenden Entmischungen innerhalb der einzelnen Legierungen und das Auftreten zahlreicher Ausscheidungen erscheinen in Bezug auf eine mögliche Korrosionsanfälligkeit bedenklich, da es zur Ausbildung von Lokalelementen kommen kann.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß der Einstückguß aus werkstoffkundlicher Sicht zu bevorzugen ist. Es lassen sich jedoch bei sorgfaltiger Ausführung auch hinreichend gute Lötverbindungen herstellen.

Verglichen mit der Vorläuferlegierung Wiron 77, zu der Werksangaben der Fa. Bego vorliegen (Tab. 20), sind die im Zugversuch ermittelten Werte für Wiron 88 niedriger.

Auffallend ist, daß der Mittelwert für die Lötung Wiron 77/WGL-Lot nur 60 N/mm² unter dem für das ungelötete Material angegebenen Wert liegt und mit 140 N/mm² bzw. 100 N/mm² deutlich über der Festigkeit der zweizeitigen Lötung bzw. Flammlötung mit Wironlot.

Auch die im Rahmen der vorliegenden Arbeit für die Verbindung Wiron 88/WGL-Lot ermittelten Werte zeigen einige besonders gute Lötungen. Wegen der großen Streuung ergibt sich im Mittel allerdings keine größere Festigkeit als bei den anderen Verfahren.
Wie oben bereits erwähnt läßt sich vermuten, daß diese Streuung mit unterschiedlich stark ausgebildeten Oxidschichten auf der Grundmaterialoberfläche in Zusammenhang steht.
Die extreme Oxidationsbereitschaft des Wiron 88 ist schon aus den Problemen mit der Gießtechnik zu ersehen, wie die Vorversuche zeigen. Möglich wäre es, daß die Oxidationsanfälligkeit von Wiron 77 etwas geringer ist und so die Lötungen zuverlässiger werden.

Einer Angabe von WEBER (34) zufolge sind die Festigkeiten von WGL-Lötungen sowohl von Wiron 77 als auch von Wiron 88 klinisch ausreichend.

Die Dehnungs-Streck-Grenze der gelöteten Prüfkörper bei den beiden Materialien sei gegenüber den ungelöteten Proben gleichermaßen nicht signifikant erniedrigt.

	Zugfestigkeit N/mm²
Wiron 77	700
Wiron 77 / WGL-Lot	640
Wiron 77 / Weißgold-/Goldlot	500
Wiron 77 / Wironlot	545

Tab. 20: Zugfestigkeiten von Wiron 77 und Wiron 77-Lötverbindungen nach Angaben der Fa. Bego (3)

5 ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit wurde die Qualität von Lötverbindungen der Nichtedelmetall-Legierung Wiron 88 mittels Zugversuch untersucht und aufgrund von metallographischen Methoden bewertet.

Die drei im Zugversuch miteinander verglichenen Lötverfahren (je 10 Prüfkörper) wiesen keine signifikanten Festigkeitsunterschiede auf; sie zeigten nur unterschiedlich breite Streuungen. Alle Lötungen hatten im Mittel eine geringere Festigkeit als die zehn im Einstückgußverfahren hergestellten Vergleichsprüfkörper aus Wiron 88 ohne Lötung.

Sowohl unter dem Licht-, als auch mit dem Rasterelektronenmikroskop zeigte diejenige Wiron 88-Probe, die mittels Flammlötung und Wironlot hergestellt war, die beste Materialverbindung. Bei der direkten Ofenlötung mit WGL-Lot kam es zu einer starken Oxidation des Grundwerkstoffes Wiron 88. Das zweizeitige Lötverfahren mit Weißgoldlotvorschwemmung und Goldlot-Anwendung in Ofenlötung zeigte bei deutlich sichtbaren Werkstoffgrenzen in der Weißgoldphase eine große Zahl von Inhomogenitäten.

Mit Hilfe von Elektronenmikrosondenmessungen an verschiedenen Stellen der Lötungen wurde die Verteilung einzelner Elemente im Bereich der Verbindungsstelle untersucht und so das Auftreten umfangreicher Diffusionsprozesse nachgewiesen.

6 SCHRIFTTUM

1. Aichhorn, W.:
Erfahrungen in Nickel-Chrom-Aufbrennkeramik
Quintess. Zahntechnik 1976, H. 11, Ref.Nr. 211

2. Bremer Goldschlägerei
Empfehlungen und Tips für die Verarbeitung Wiron 77, Wiron 88, Wirobond
Fa. Bego 2800 Bremen 41, Emil-Sommer-Str. 7-9
3. Aufl., April 1984

3. Bremer Goldschlägerei
BEGO 2800 Bremen 41, Emil-Sommer-Str. 7-9
pers. Mitteilung 1985

4. Dielert, E.:
Zerstörungsfreie-, mechanisch-technologische-, metallographische- und elektrochemische Untersuchungen an im zahntechnischen Laboratorium hergestellten Lötungen von Dentallegierungen
Med. Diss. München 1977

5. Dielert, E.:
Mechanisch-technologische und metallographische Untersuchungen an Lötungen von Dentallegierungen
Dtsch. zahnärztl. Z. 33, 543 (1978)

6. DIN 8505
Löten Teil 1
Beuth, Berlin - Köln 1979

7. DIN 8511
Flußmittel zum Löten metallischer Werkstoffe
Beuth, Berlin - Köln 1967

8. DIN 13 906
Goldgußlegierungen - Anforderungen, Prüfung
Beuth, Berlin - Köln 1982

9. Eichner, K.:
Metallkeramik in der zahnärztlichen Prothetik
Carl Hanser Verlag, München, Wien 1979

10. Gundlach, H.-W.:
Technologische Aspekte von edelmetallfreien Aufbrennlegierungen am Beispiel Wiron
in: Medizinische und technologische Aspekte dentaler Alternativlegierungen
Verlag "Die Quintessenz", Berlin 1983

11. Hässler, C., Stumpf, H., Gehre, G.:
Metallkeramik zur Verbesserung der prothetischen Versorgung der Bevölkerung der DDR, Teil 3
Stomatologie der DDR 33, 766 (1983)

12. Hohmann, W.:
Qualitätsmerkmale von edelmetallfreien Dentalgußwerkstoffen
Quintess. Zahntechnik 1984, H. 1, Ref.Nr. 806

13. Klagges, G.:
Untersuchungen von Lötverbindungen der Edelmetallegierung Degulor M und der Nichtedelmetallegierung Wironit
Med. Diss. FU Berlin 1983

14. Knischewski, F., Rau, G.:
Grundwissen für Zahntechniker, Teil 1
Verlag Neuer Merkur GmbH, München 1975

15. Kollmannsperger, P., Helfmeier, H.:
Zur Analyse von Edelmetall-Dentallegierungen
Dtsch. zahnärztl. Z. 38, 1040 (1983)

16a Koppe-Gründt, R.:
Untersuchungen von Lötungen an goldreduzierten Legierungen für metallkeramischen Zahnersatz
Med. Diss. FU Berlin 1983

16b Kriebel, R., Moore, B.K., Goodacre, C.J., Dykema, R.W.:
A Comparison of the Strength of Base Metal and Gold Solder Joints
J. prosth. Dent. 51, 60 (1984)

17. Langenbach, K.:
Untersuchung der Biegefestigkeits- und elastischen Eigenschaften von Aufbrennlegierungen der Metallkeramik in Abhängigkeit vom Lötverfahren
Med. Diss. Köln 1981

18. Lüder, E.:
Löten
Carl Hanser Verlag, München, Wien 1966

19. Marxkors, R., Meiners, H.:
Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde
Carl Hanser Verlag, München, Wien 1978

20. Merz, H.:
Metallkeramik mit Nichtedelmetallegierungen
Zahntechnik 25, 13 (1984)

21. Neidlinger, A.:
Ceramalloy, eine Aufbrennlegierung
Quintess. Zahntechnik 1984, H. 2, Ref.Nr. 811

22. Partz, K.-D.:
Einfluß von Lötparametern auf die Zugfestigkeit stumpfgelöteter Hochtemperaturverbindungen
Ing. Diss. Techn. Hochschule Aachen 1981

23. Saxton, P.L.:
Postsoldering of Nonprecious Alloys
J. prosth. Dent 43, 592 (1980)

24. Schatt, W.:
Einführung in die Werkstoffwissenschaften
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie
Leipzig 1981

25. Schatz, J.:
Die metallurgischen Vorgänge zwischen Hartlot und Grundwerkstoffen und Folgerungen für die lötgerechte Konstruktion.
Schweißen und Schneiden 9, 522 (1957)

26. Schumann, H.:
Metallographie
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie
Leipzig 1980

27. Skinner, E., Phillips, R.:
The Science of Dental Materials
W.B. Saunders Company 1967

28. Stade, E.H., Reisbick, M.H., Preston, J.D.:
Preceramic and Postceramic Solderjoints
J. prosth. Dent. 34, 527 (1975)

29. Staffanou, R.S., Radke, M.H., Jendresen, M.D.:
Strength Properties of Soldered Joints from Various Ceramic Metal Kombinations
J. prosth. Dent. 43, 31 (1980)

30. Townsend, L.W.A., Vermilyea, S.G., Griswold, W.H.:
Soldering Nonnoble Alloys
J. prosth. Dent. 50, 51 (1983)

31. Tucillo, J.J., Cascone, P.J.:
Die Entwicklung der Aufbrennlegierung für die Metall-Keramik-Verblendtechnik
in: McLean, J.W.: Dentalkeramik
Verlag "Die Quintessenz", Berlin 1984

32. Walters, R.A.:
A Photomicrographic Evaluation of the Solder Joint Between Precious and Nonprecious Metal
J. prosth. Dent. 35, 689 (1976)

33. Weber, H.:
Wie weit kommen wir ohne Edelmetalle?
Zahnärztl. Mitt. 21, 2196 (1982)

34. Weber, H.:
Zur Lötung von Nichtedelmetall-Legierungen
Referat auf der Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft Dentale Technologie e.V., Sindelfingen, 1984

35. Weikart, P.:
Werkstoffkunde für Zahnärzte
Carl Hanser Verlag, München, Wien 1966

36. Weiss, P.A.:
Stand der Metall-Keramik-Technik
in: McLean, J.W.: Dentalkeramik
Verlag "Die Quintessenz", Berlin 1984

37. Wiegand, H.:
Lote
Z. Werkstofftechnik 11, 223 (1980)

38. Zimmermann, K.F.:
Hartlöten. Regeln für Konstruktion und Fertigung
Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf, 1969

39. Zinke, A.:
Mikromorphologische Untersuchungen über Lötungen der Edelmetall-Aufbrennlegierung Degudent U
Med. Diss. FU-Berlin 1984

Abb. 2: Gegossener Prüfkörper

Abb. 3: Prüfkörperhälften mit Weißgoldvorschwemmung

Abb. 4: Schablone zum Fixieren der Prüfkörperhälften

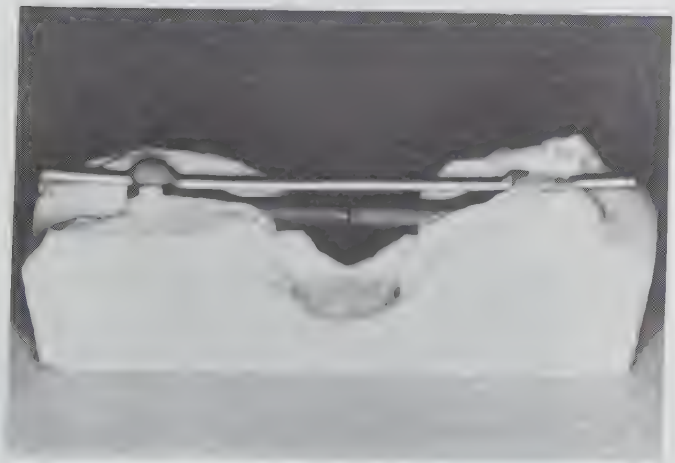


Abb. 5: Lötblock

Abb. 6: Gelötete Prüfkörper
WGL-Lot - Weißgold/Goldlot - Wironlot

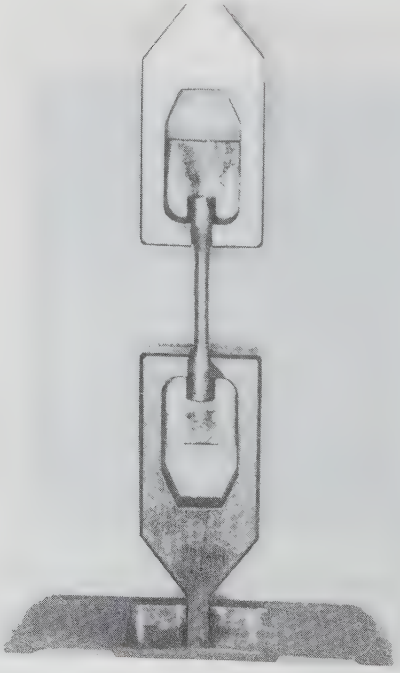


Abb. 7:
Prüfkörper in den Zerreißzangen der Instronuniversalprüfmaschine

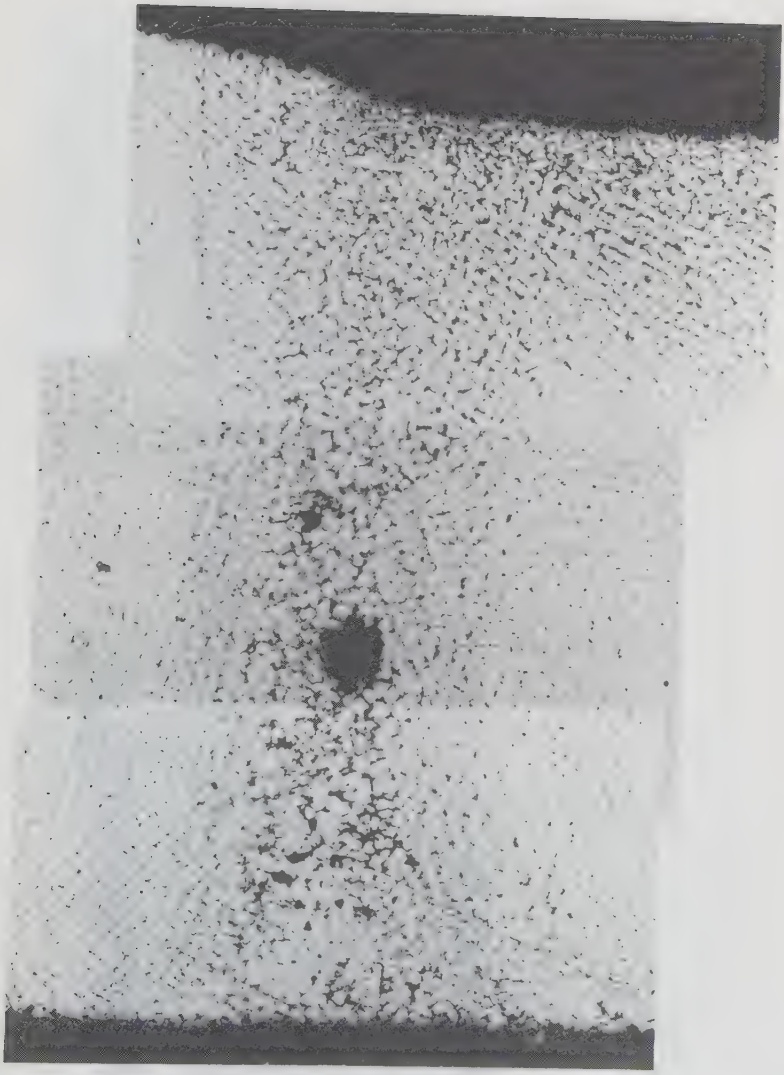


Abb. 10: Verbindung der NEM-Legierung Wiron 88 mit Wironlot durch Flammlötung
Auflichtmikroskop, V = 225:1

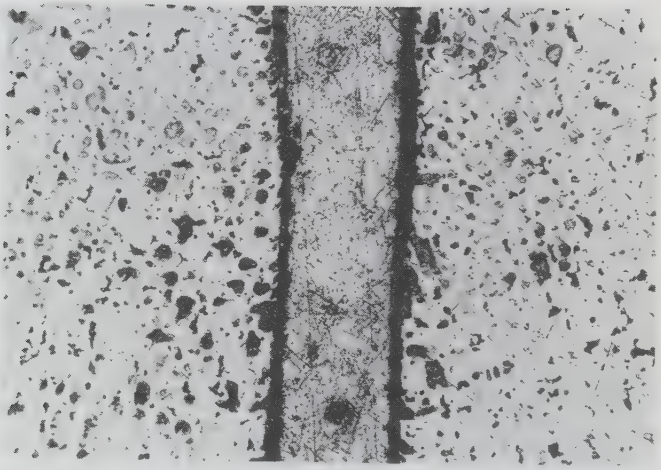


Abb. 11a: Ofenlötung von Wiron 88 mit WGL-Lot,
Auflichtmikroskop, V = 225:1

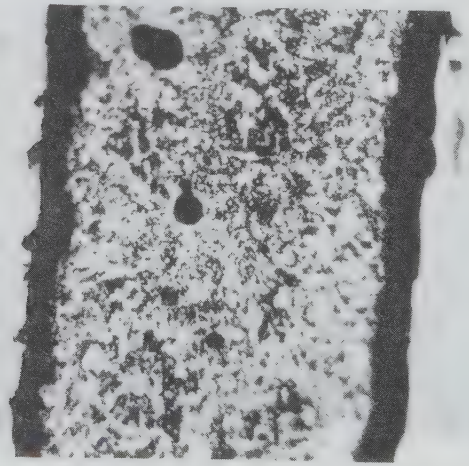
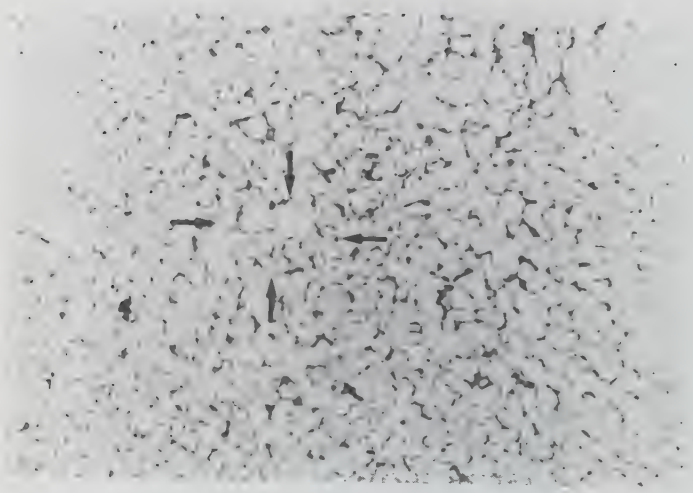


Abb. 11b: Ofenlötung, WGL-LOT,
Auflichtmikroskop, V = 450:1

Abb. 12: Ofenlötung von Wiron 88 mit Weißgold- und Goldlot, Auflichtmikroskop, V = 450:1



Wiron Wiron-Lot Wiron

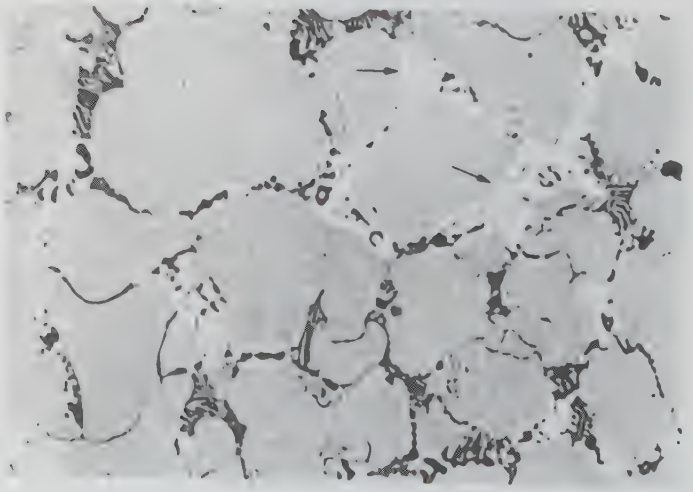


Abb. 13: Lötungen von Wiron 88 mit Wironlot - Lötspalt, REM, V = 600

Abb. 14: Ausschnitt aus dem Lotbereich von Abb. 13
REM, V = 4000

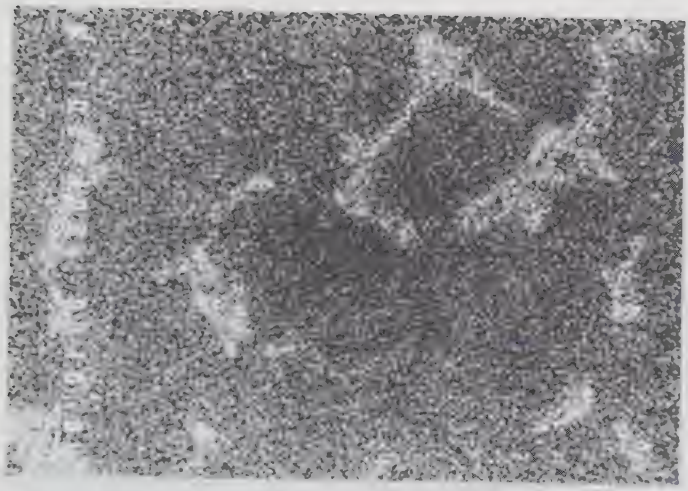


Abb. 14a: Elementverteilungsbild des Si, K_α-Strahlung

Abb. 14b: Elementverteilungsbild des Mo, L_α-Strahlung

Die Elementverteilungsbilder 14a bis f wurden an der in der Abb. 14 wiedergegebenen Stelle im Wironlot gewonnen.

REM, V = 4000

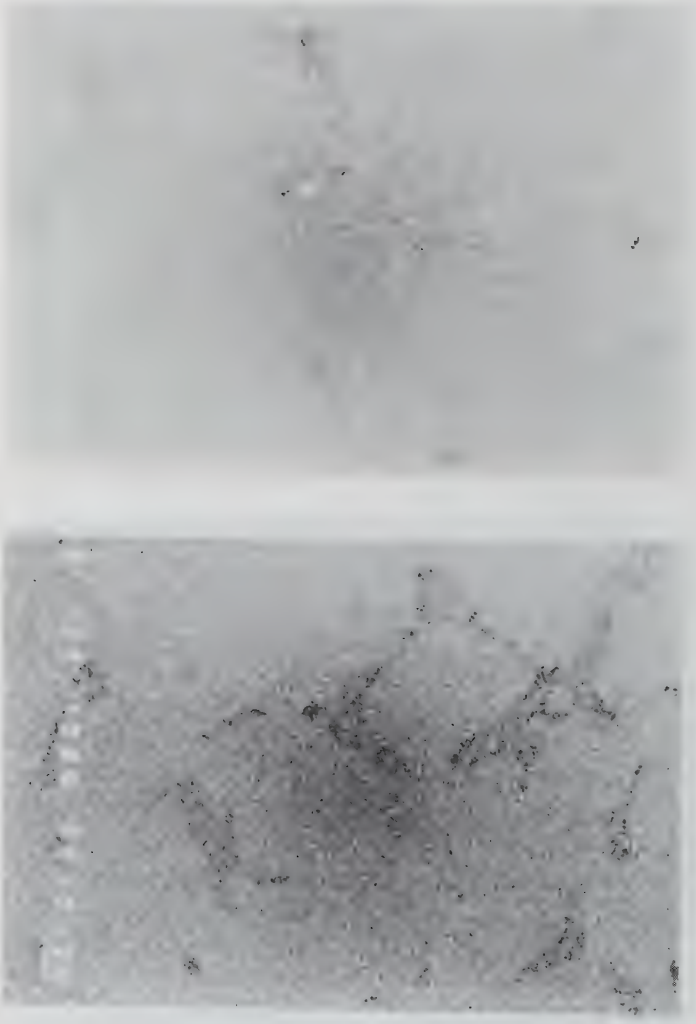


Abb. 14c: Elementverteilungsbild des Cr, K_{α}-Strahlung
Abb. 14d: Elementverteilungsbild des Ni, K_{α}-Strahlung

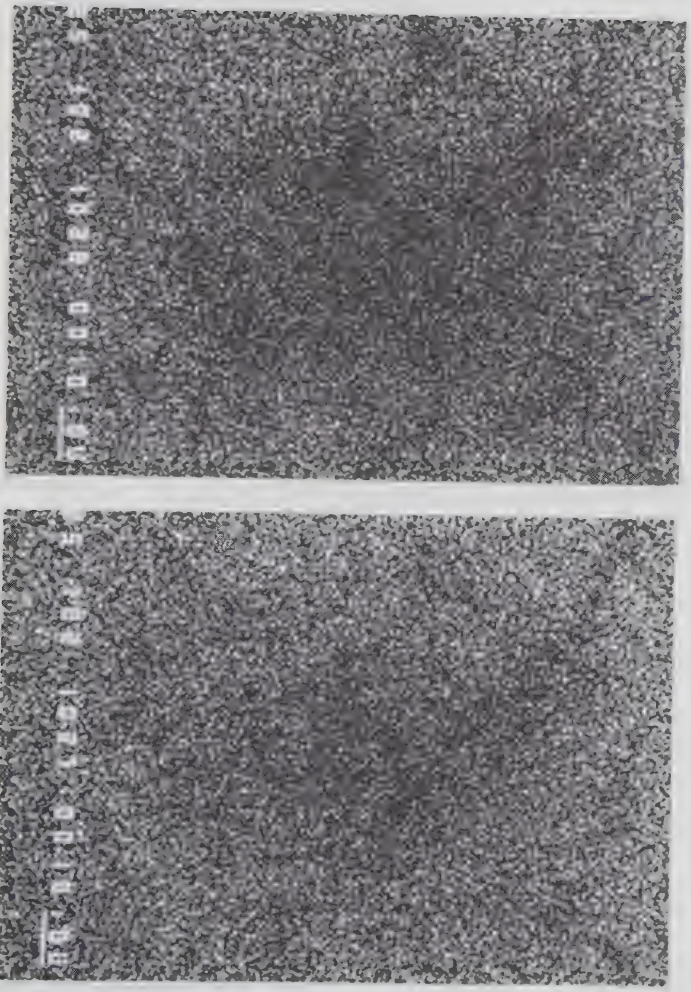


Abb. 14e: Elementverteilungsbild des Fe, K_α-Strahlung
Abb. 14f: Elementverteilungsbild des Co, K_α-Strahlung

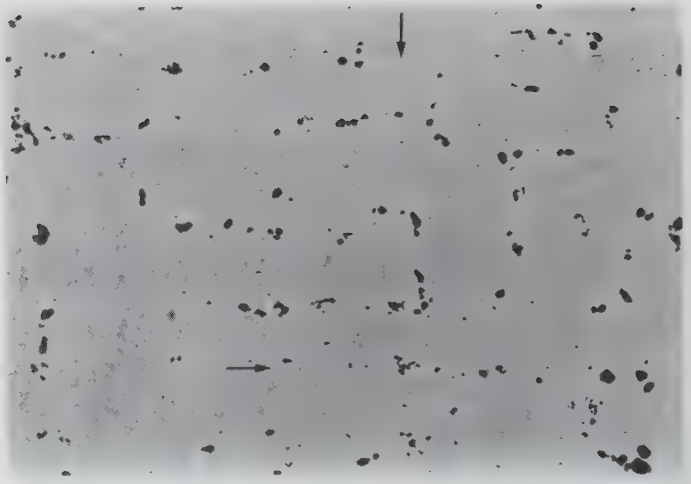


Abb. 14g: Gefügebild des Grundwerkstoffes Wiron 88 nach einmaligem zahntechnischen Vergießen
REM, V = 4000

WGL-Lot

Wiron 88

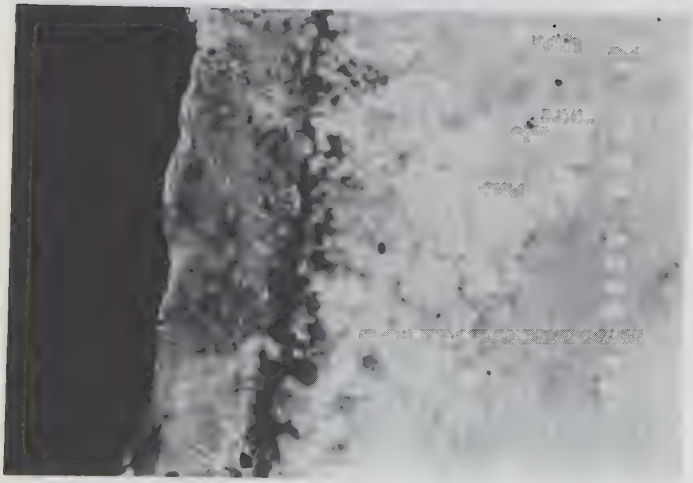


Abb. 15a: Lötung von Wiron 88 mit WGL-Lot, REM, V = 4000

Abb. 15b: Lötung von Wiron 88 mit WGL-Lot, REM, V = 400

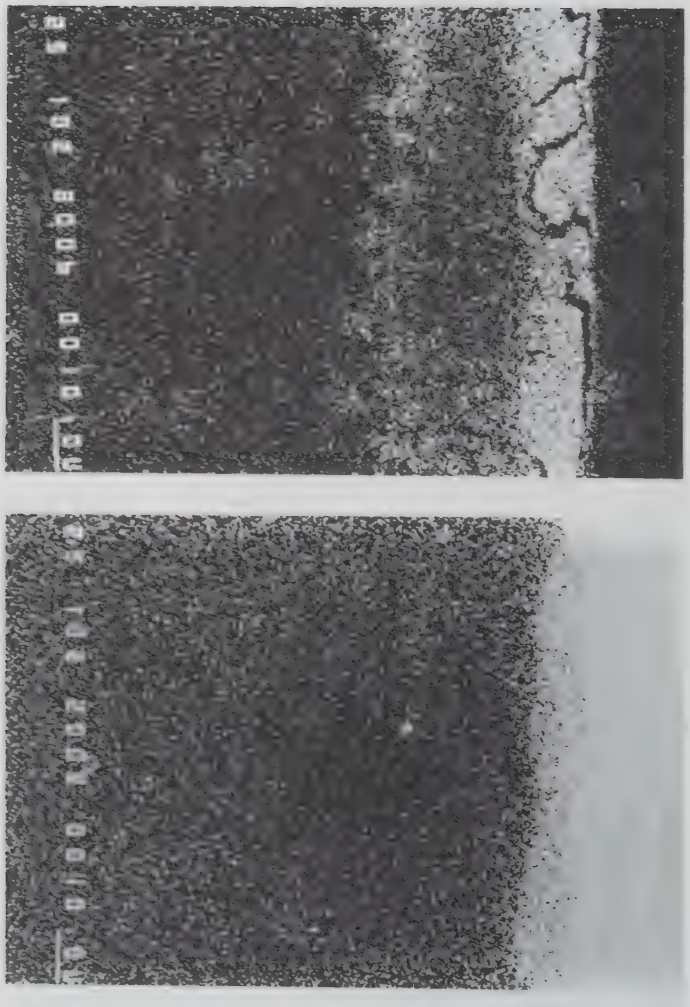
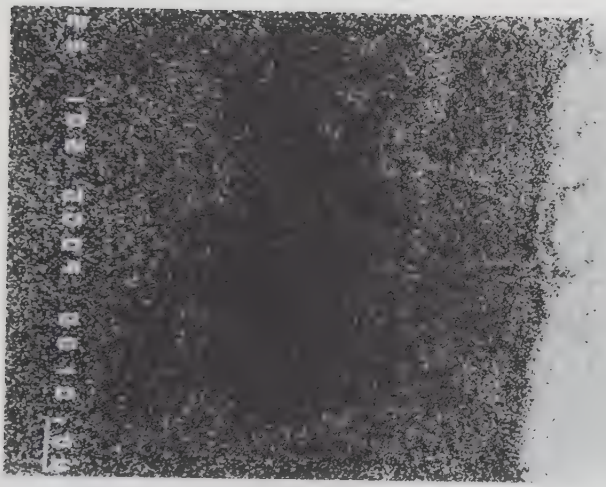


Abb. 15c: Elementverteilungsbild des O, K_α-Strahlung
Abb. 15d: Elementverteilungsbild des Cr, K_α-Strahlung

Die Elementverteilungsbilder Abb. 15c bis k wurden an der in Abb. 15a und b wiedergegebenen Stelle des Lötspaltes gewonnen (rechts im Bild: Wiron 88). REM, V = 4000



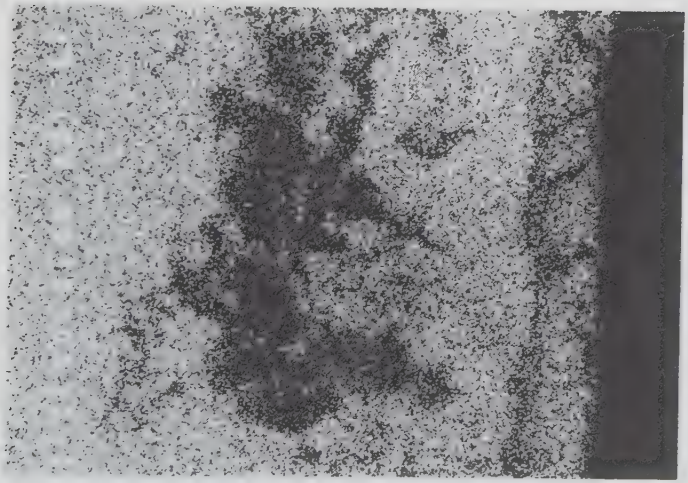
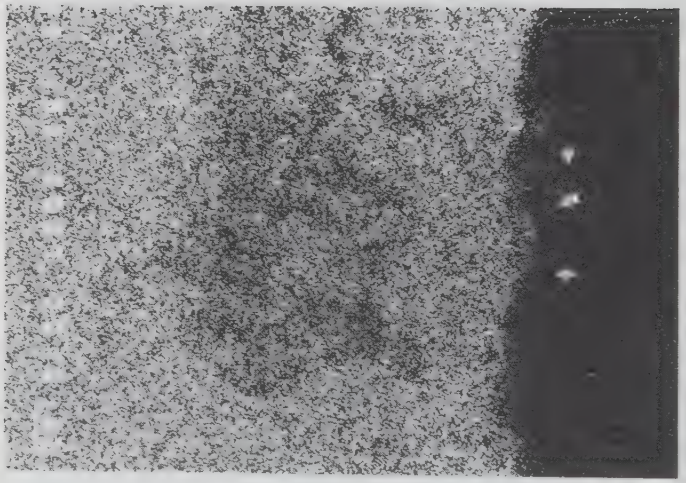


Abb. 15e: Elementverteilungsbild des Ni, K_α-Strahlung

Abb. 15f: Elementverteilungsbild des Zn, K_α-Strahlung



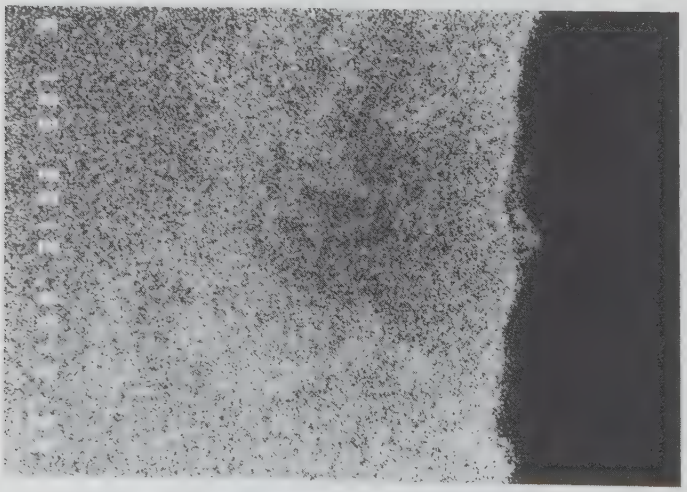


Abb. 15g: Elementverteilungsbild des Ag, L_{α}-Strahlung

Abb. 15h: Elementverteilungsbild des Au, L_{α}-Strahlung

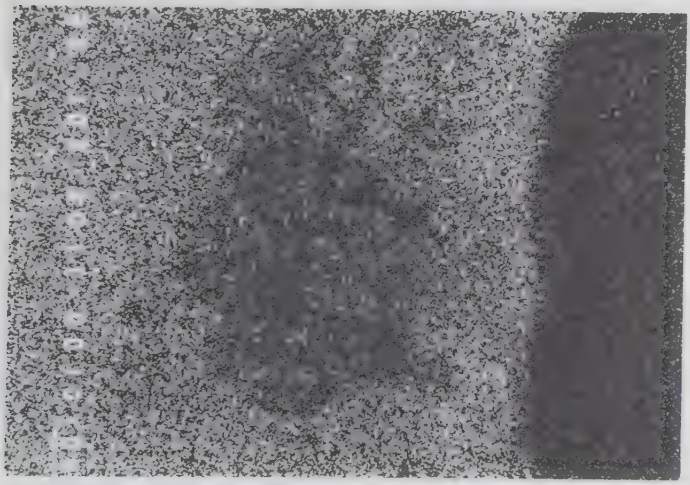
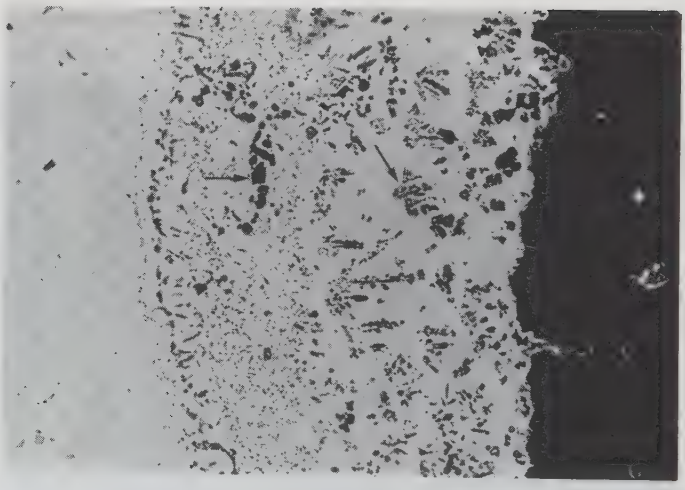


Abb. 15i: Elementverteilungsbild des Mo, L_α-Strahlung

Abb. 15k: Elementverteilungsbild des Cu, K_α-Strahlung



Goldlot Weißgoldlot Wiron 88

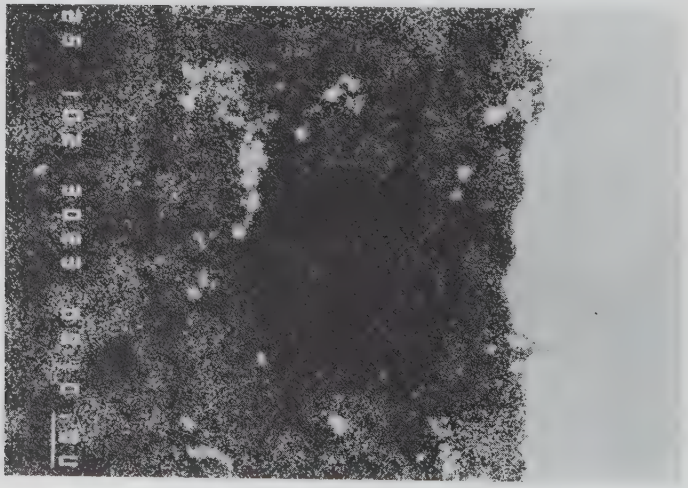


Abb. 16a: Ofenlötung mit Weißgold-/Goldlot, REM, V = 4000
Abb. 16b: Elementverteilungsbild des Cr, K_α-Strahlung

Die Elementverteilungsbilder Abb. 16b bis l wurden an der in Abb. 16a wiedergegebenen Stelle des Lötspaltes gewonnen (rechts im Bild Wiron 88). REM, V = 4000

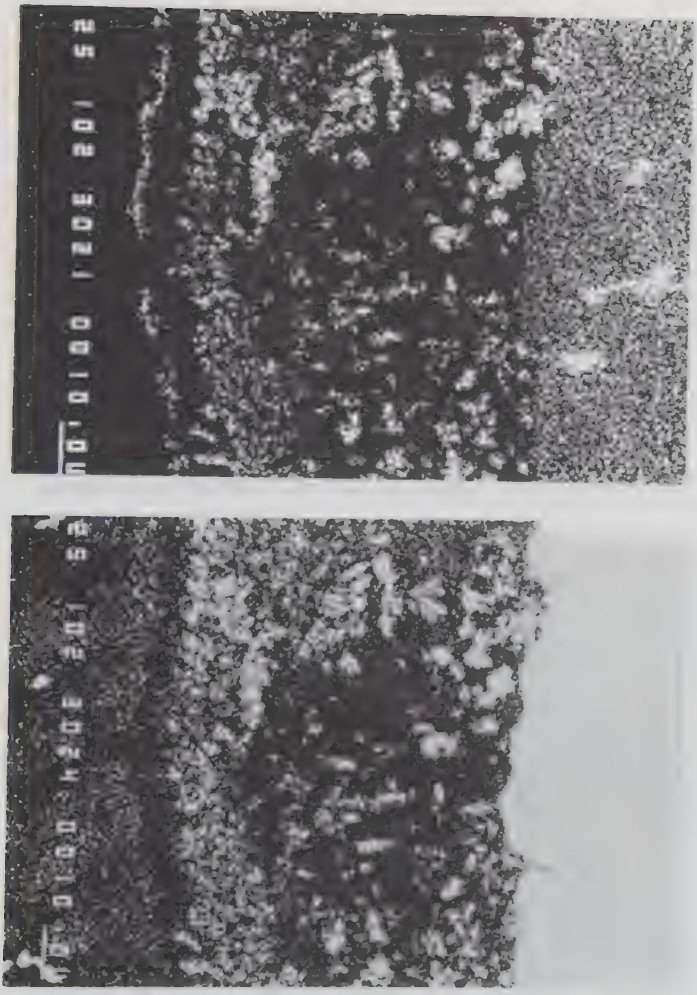


Abb. 16c: Elementverteilungsbild des Mo, L_α-Strahlung
Abb. 16d: Elementverteilungsbild des Ni, K_α-Strahlung

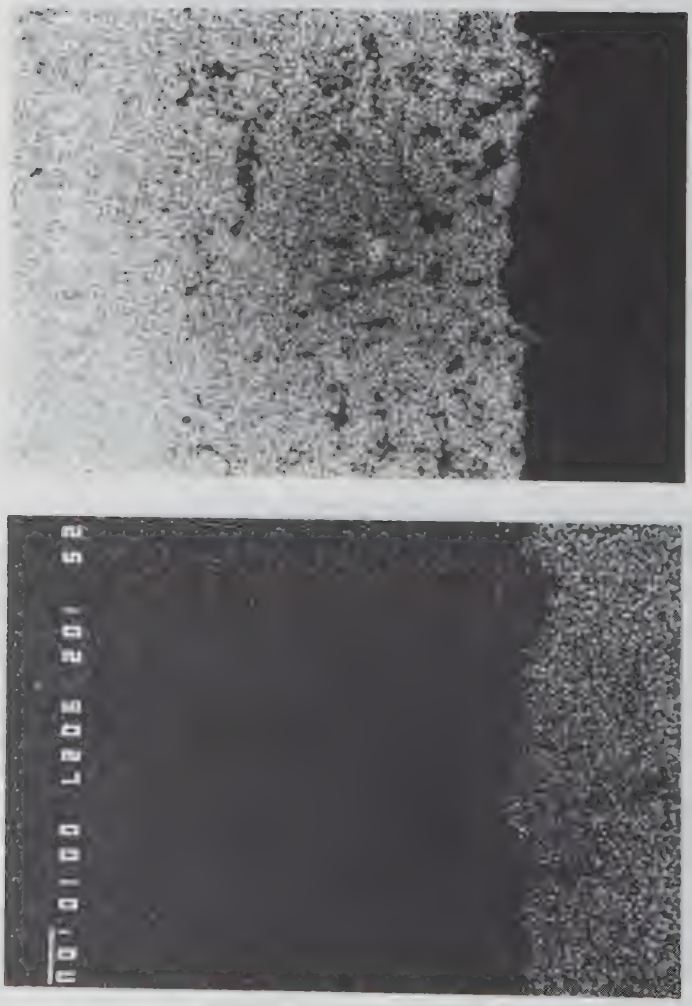


Abb. 16e: Elementverteilungsbild des Au, L_α-Strahlung
Abb. 16f: Elementverteilungsbild des Zn, K_α-Strahlung

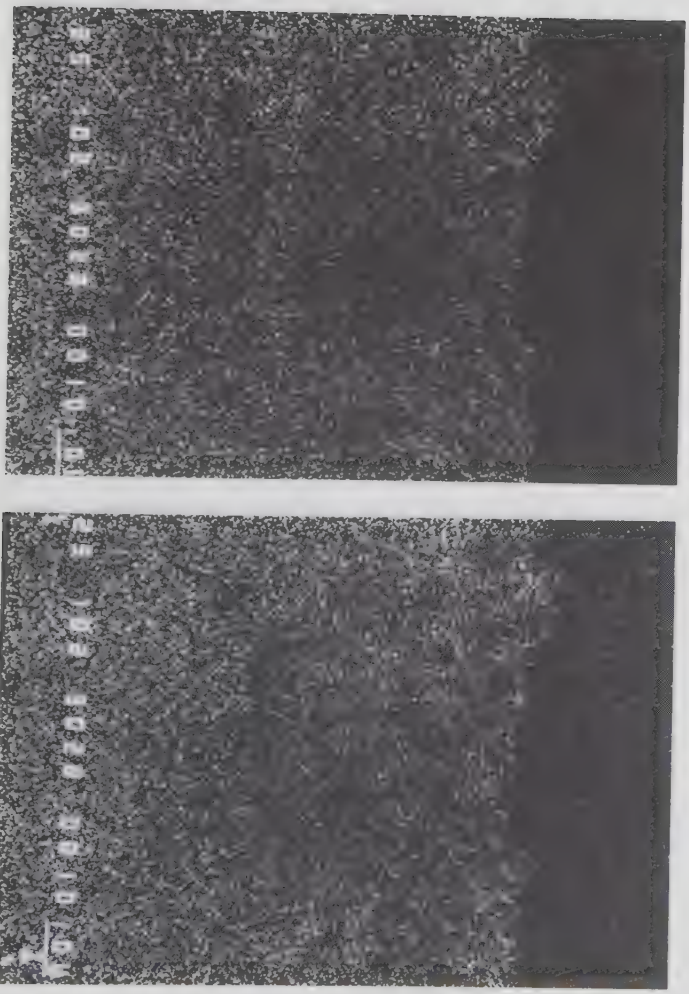


Abb. 16g: Elementverteilungsbild des Ag, L_α-Strahlung

Abb. 16h: Elementverteilungsbild des Pd, L_α-Strahlung

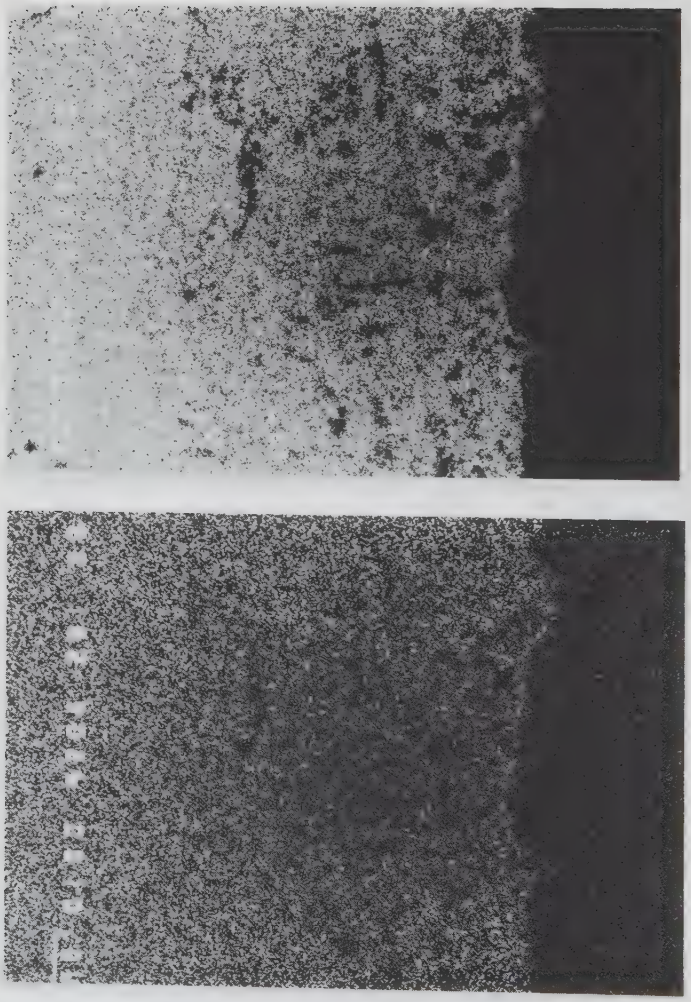


Abb. 16i: Elementverteilungsbild des Cu, K_α-Strahlung

Abb. 16k: Elementverteilungsbild des Fe, K_α-Strahlung

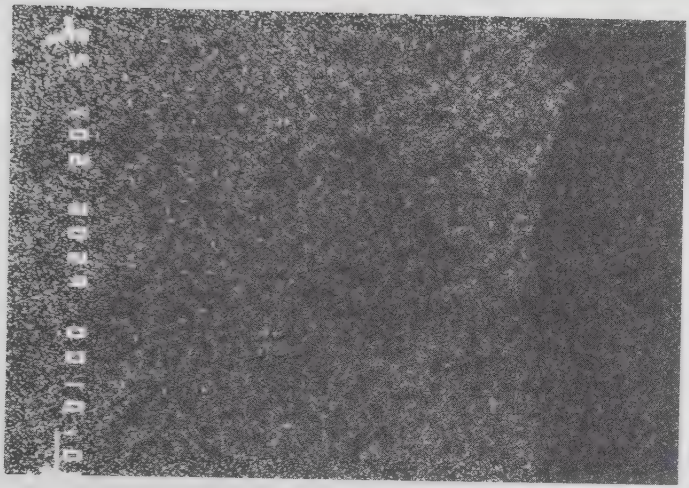


Abb. 161: Elementverteilungsbild des Sn, L_{α}-Strahlung

8 LEBENSLAUF

Am 17. Dezember 1956 wurde ich als erstes Kind des Lehrers Heribert Schätze und seiner Ehefrau Dagmar, geb. Behrend, in Berlin geboren.
Von 1963 bis 68 besuchte ich die Grundschule in Berlin, dann während eines USA-Aufenthaltes von 1968 bis 69 die Elementary-School in West Caldwell, New Jersey.

Nach sechsjährigem Gymnasialbesuch in Berlin bestand ich 1975 die Reifeprüfung an der Walther-Rathenau-Schule.

Im Oktober 1975 immatrikulierte ich mich an der Freien Universität Berlin und begann das Studium der Zahnmedizin. An der Freien Universitat legte ich 1978 die zahnärztliche Vorprüfung und 1981 die zahnarztliche Prüfung ab.

Am 17. Februar 1981 erhielt ich die Bestallung als Zahnärztin.

Seit April 1981 arbeite ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung für klinische Prothetik (Leiter: Prof. Dr. Karl Eichner) des Fachbereichs Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Freien Universität Berlin.

Herrn Professor Dr. med. dent. Karl Eichner möchte ich an dieser Stelle meinen Dank für die freundliche Überlassung des Themas und die stets wohlwollende Unterstützung meiner Arbeit aussprechen.

Für ihre Hilfe bei der Herstellung der Prüfkörper danke ich den Zahntechnikern der Fa. Bego, Berlin und den Zahntechnikern der Zahnklinik der FU Berlin.

Bei der Durchführung der Zugversuche und der Herstellung der metallographischen Schliffproben wurde ich in dankenswerter Weise von den Mitarbeitern des Instituts für Klinisch-Theoretische Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, insbesondere von Herrn Dr. Dermann, unterstützt.

Dank schulde ich auch den Mitarbeitern der Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin, besonders Herrn Ing. grad. Meyer, der sehr intensiv und genau mit der Durchführung der Untersuchungen am analytischen Rasterelektronenmikroskop befaßt war. Mit viel Geduld und Freundlichkeit ist er auf alle meine Fragen eingegangen.

Besondere Erwähnung verdient auch das Entgegenkommen von Herrn Dr. Gundlach, Fa. Bego, Bremen, der meine Arbeit öfter durch schnelle und großzügige Auskünfte unterstützt hat.